



TESIS - SF142502

**PEMANFAATAN METODE RESISTIVITAS
KONFIGURASI WENNER-SCHLUMBERGER UNTUK
EVALUASI TANGGUL SUNGAI BRANTAS GUNA
MENCEGAH TERJADINYA LONGSOR**

Firdha Kusuma Ayu A.
1114 201 002

DOSEN PEMBIMBING
Dr.rer.nat. Eko Minarto

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN GEOFISIKA
JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



THESIS - SF142502

**APPLICATION OF RESISTIVITY METHOD
WENNER-SCHLUMBERGER ARRAY TO EVALUATE
BRANTAS RIVER EMBANKMENT AS AVOIDING
LANDSLIDE**

Firdha Kusuma Ayu A.
1114 201 002

SUPERVISOR
Dr.rer.nat. Eko Minarto

MAGISTER PROGRAMME
GEOPHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES
INSTITUTE OF TECHNOLOGY SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Master Sains (M.Si)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**oleh:
Firdha Kusuma Ayu Anggraeni
NRP. 1114 201 002**

**Tanggal Ujian : 22 Juni 2016
Periode Wisuda : September 2016**

Disetujui oleh:

1. Dr. rer-nat. Eko Minarto, S.Si, M.Si.
NIP. 19750205 199903 1 004

(Pembimbing)

(.....)

2. Prof. Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, SU
NIP. 19620802 198701 1 001

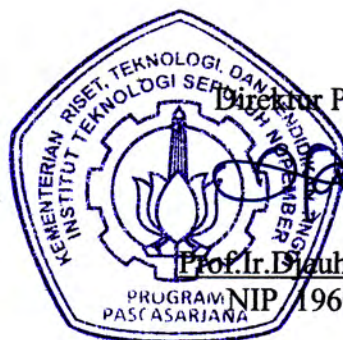
(Penguji I)

(.....)

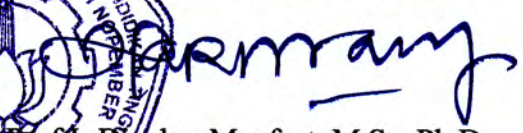
3. Dr. Mashuri, M.Si.
NIP. 19691216 199402 1 001

(Penguji II)

(.....)



Direktor Program Pascasarjana


Prof. Ir. Isauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D.

NIP. 19601202 198701 1 001

PEMANFAATAN METODE RESISTIVITAS KONFIGURASI WENNER-SCHLUMBERGER UNTUK EVALUASI TANGGUL SUNGAI BRANTAS GUNA MENCEGAH TERJADINYA LONGSOR

Nama mahasiswa : Firdha Kusuma Ayu Anggraeni

NRP : 1114201001

Pembimbing : Dr.rer.nat Eko Minarto

ABSTRAK

Sungai Brantas merupakan sungai terbesar kedua di pulau Jawa yang melewati 9 kabupaten dan 6 kota, termasuk Mojokerto. Lereng tanggul Sungai Brantas di Desa Mlirip dan Lengkong mengalami longsor yang mana lokasi tersebut dekat dengan jalan raya dengan lalu lintas lumayan padat. Oleh karenanya dilakukan evaluasi berdasarkan ada atau tidaknya rembesan dan retakan untuk mengidentifikasi tingkat kerentanan terhadap longsor. Metode geofisika yang digunakan adalah metode resistivitas dengan konfigurasi Wenner-Schlumberger. Terdapat 4 lintasan yang digunakan saat akuisisi data. Pada lintasan pertama dengan panjang 100 meter diduga terdapat rembesan pada titik 35-45 meter dan retakan 60-75 meter. Kemudian lintasan kedua dengan panjang 200 meter, ada dugaan bahwa terdapat keretakan atau patahan di titik 65-90 meter dan rembesan di titik 110-125 meter. Lintasan ketiga memiliki panjang 200 meter dimana di titik 20-35 meter dan 110-140 meter diduga terjadi keretakan di tubuh tanggul dan di titik 55 – 75 meter terjadi rembesan. Terakhir, untuk lintasan 4 diindikasikan bahwa tanggul masih berfungsi dengan baik. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa tanggul lintasan 1, 2, dan 3 kurang layak karena di beberapa titik mengalami rembesan dan retakan.

Kata kunci: tanggul, longsor, rembesan, retakan, resistivitas,

APPLICATION OF RESISTIVITY METHOD WENNER-SCHLUMBERGER ARRAY TO EVALUATE BRANTAS RIVER EMBANKMENT AS AVOIDING LANDSLIDE

Name : Firdha Kusuma Ayu Anggraeni
Student Identity : 1114201002
Supervisor : Dr. rer-nat. Eko Minarto

ABSTRACT

Brantas river is the second biggest river in Java which passes 9 district and 6 cities, include Mojokerto. Landslide of embankment slope Brantas river was occurred at Lengkong and Mlirip, Mojokerto. The location of landslide is near from crowded highway. Therefore evaluation based on the existence of seepage and fracture is needed to identification vulnerability to landslide. Geophysics method that used is resistivity method using Wenner-Schlumberger Array. There are 4 line for data acquisition. First line with length 100 m, suspected there is seepage at point 35-45 m and fracture at 60-75 m. Then, second line with length 200 m, there is a suspect of fracture at point 65-90 m and seepage at point 110-125 m. Third line has length 200 m where at point 20-35 m and 110-140 m are suspected as fracture and at point 55-75 m is suspected as seepage. The last, fourth line is indicated that the embankment was good. Therefore it can be concluded that the embankments at line 1, 2, and 3 are less worthy because at several points there are seepage and fracture.

Keywords : embankment, landslide, seepage, fracture, resistivity

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	ii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB 2.TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Kondisi Geologi Sungai Brantas.....	7
2.2 Tanggul Sungai	9
2.2 Kerusakan Tubuh Tanggul.....	10
2.4 Erosi Internal.....	12
2.4.1 Penyebab Erosi Internal.....	12
2.5 Metode Geofisika dan Pengukuran Geofisika.....	14
2.5.1 Metode Geofisika.....	14
2.5.2 Pengukuran Geofisika.....	15
2.6 Metode Resistivitas.....	15
2.6.1 Teori Dasar.....	15
2.6.2 Konfigurasi Elektroda.....	19
2.6.3 Prosedur Lapangan Survei Resistivitas.....	21
2.6.4 Noise Pada Survei Resistivitas.....	22

2.6.5 Aplikasi Metode Resistivitas.....	23
2.7 Sifat Kelistrikan Batuan.....	23
2.8 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Resistivitas.....	25
2.9 Teori Inversi, Sensitivitas, dan <i>Finite Element Modelling</i> (FEM).....	26
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	35
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	35
3.1.1 Waktu Penelitian.....	35
3.1.2 Tempat Penelitian.....	35
3.2 Diagram Kerja Penelitian.....	38
3.3 Peralatan Penelitian.....	38
3.4 Prosedur Pengambilan Data.....	39
3.5 Pengolahan Data.....	40
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	41
BAB 5. PENUTUP.....	55
5.1 Kesimpulan.....	55
5.2 Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA.....	57
LAMPIRAN.....	61
BIOGRAFI PENULIS.....	71

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Peta Wilayah Sungai Brantas.....	7
2.2 Ilustrasi kubus uniform yang dialiri listrik.....	16
2.3 Susunan elektroda yang digunakan untuk survei resistivitas, dimana A, B adalah elektroda arus dan M, N adalah elektroda potensial.....	18
2.4 Dipole arus (garis merah) dan medan potensial (garis putus- putus) dalam medium homogen.....	18
2.5 Susunan elektroda untuk konfigurasi Wenner.....	20
2.6 Susunan elektroda konfigurasi Schlumberger.....	20
2.7 Susunan elektroda konfigurasi Wenner-Schlumberger.....	20
2.8 Susunan elektroda konfigurasi dipole dipole.....	21
3.1 Lokasi penelitian pada google earth.....	35
3.2 Lokasi penelitian evaluasi tanggul Sungai Brantas di Desa Lengkong dan Mlirip, Mojokerto (a) lintasan pertama (b) lintasan kedua (c) lintasan ketiga (d) lintasan keempat.....	37
3.3 Diagram kerja penelitian.....	38
3.4 Desain susunan elektroda konfigurasi Wenner-Schlumberger.....	39
4.1 Penampang lintasan 1.....	42
4.2 Hasil inversi data VLF sebagai data pembanding.....	43
4.3 Kondisi plengsengan tanggul yang runtuh.....	44
4.4 Penampang lintasan 2.....	45
4.5 Hasil pengolahan data VLF.....	46
4.6 Kondisi lintasan 2 tampak depan.....	47
4.7 Penampang lintasan 3.....	48
4.7 Pengolahan data VLF.....	49

4.9	Kondisi tanggul yang longsor.....	50
4.10	Penampang lintasan 4.....	51
4.11	Lintasan 4 tampak depan.....	52
4.12	Penampang vertikal dari empat lintasan pengukuran di Desa Lengkong dan Mlirip, Mojokerto.....	53

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Penyebab Kegagalan Fungsi Tanggul.....	12
2.2 Nilai resistivitas beberapa tanah/batuan/air.....	25
3.1 Faktor kedalaman konfigurasi Wenner-Schlumberger.....	40
4.1 Nilai resistivitas bawah permukaan lintasan 1.....	43
4.2 Nilai resistivitas bawah permukaan lintasan 2.....	45
4.3 Nilai resistivitas bawah permukaan lintasan 3.....	48
4.4 Nilai resistivitas bawah permukaan lintasan 4.....	51

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Keberadaan tanggul di sepanjang sungai sangat penting guna melindungi kehidupan, harta benda terhadap genangan-genangan yang disebabkan oleh banjir. Kontruksi tanggul berupa urukan tanah karena tanah merupakan bahan yang sangat mudah menyesuaikan diri dengan lapisan pondasi yang mendukung dan dapat dengan mudah pula menyesuaikan apabila terdapat kemungkinan penurunan yang tidak rata. Bahan urukan yang dibutuhkan tersebut sangat besar karena tanggul merupakan bangunan menerus yang sangat panjang (Sosrodarsono, 1985).

Pemeliharaan tanggul sungai sangat penting agar sungai tetap berfungsi dengan baik. Agar tidak terjadi kelongsoran pada tanggul, biasanya tanggul diperkuat dengan membuat bronjong, plengsengan, dan pemasangan tiang pancang (Warnana, 2008). Tubuh tanggul dapat mengalami beberapa kerusakan yang disebabkan oleh beberapa hal seperti terbentuknya bidang gelincir akibat kemiringan lereng tanggul yang curam, terjadi keruntuhan lereng tanggul, terjadi kebocoran pada pondasi tanggul, dan lain sebagainya (Sosrodarsono, 1985).

Telah disebutkan bahwa salah satu hal yang menyebabkan rusaknya tubuh tanggul adalah adanya keruntuhan atau longsor lereng tanggul. Pengertian longsor sendiri adalah peristiwa pergerakan massa tanah atau batuan pada lereng karena ketidakstabilan tanah atau batuan tersebut (Arif, 2008). Penyebab terjadinya kelongsoran tersebut dapat disebabkan oleh beberapa hal antara lain, adanya penambahan beban pada lereng tanggul, kenaikan tekanan air pori, dan tekanan rembesan oleh genangan air dalam tanah (Hardiyatmo, 2006). Kemudian berdasarkan Aitsebaomo *et al.*(2013), ada beberapa alasan utama mengapa fungsi tanggul menjadi gagal, antara lain erosi internal, ketidakstabilan geologi, pemeliharaan yang buruk, curah hujan yang ekstrem, dan kesalahan manusia. Di dalam Aitsebaomo *et al.* (2013) juga menuliskan bahwa erosi internal adalah hal yang sering menyebabkan adanya kelongsoran pada tanggul sungai. Erosi internal

tersebut disebabkan adanya rembesan air yang menyebabkan posisi dan pondasi tanggul menjadi lemah dan rawan.

Sungai Brantas merupakan sungai terbesar kedua di pulau Jawa. Berdasarkan Balai Besar Wilayah Sungai Brantas (2011), panjang Sungai Brantas lebih kurang 320 km dan memiliki cakupan area lebih kurang 14.103 km² yang mencakup sekitar 25% luas provinsi Jawa Timur. Sungai Brantas melewati wilayah administrasi 9 kabupaten (Malang, Blitar, Tulungagung, Trenggalek, Kediri, Nganjuk, Jombang, Mojokerto, dan Sidoarjo) dan 6 kota (Batu, Malang, Blitar, Kediri, Mojokerto, dan Surabaya).

Salah satu wilayah yang dilalui Sungai Brantas adalah Mojokerto. Debit air Sungai Brantas di wilayah Mojokerto mencapai lebih kurang 10.031 liter/detik. Jenis penguatan tanggul telah dilakukan di tanggul Sungai Brantas wilayah Mojokerto, namun ada beberapa yang mengalami kegagalan sehingga menyebabkan keruntuhan atau kelongsoran lereng tanggul. Longsor lereng tanggul sungai Brantas terjadi Desa Mlirip, Kecamatan Jetis, Mojokerto. Pada tahun 2012, di daerah tersebut tanggul pernah mengalami penurunan tanah (longsor). Penyebab dari longsor tanggul tersebut diperkirakan disebabkan oleh adanya erosi internal di tanggul Sungai Brantas. Pasca longsor (hingga saat ini), perbaikan hanya dilakukan seadanya yaitu hanya berupa timbunan karung pasir di plengsengan yang jebol.

Lokasi longsor tanggul tersebut berada dekat dengan jalan raya dengan lalu lintas yang lumayan padat. Mengingat akan bahaya yang dapat ditimbulkan apabila longsor kembali terjadi, maka diperlukan penelitian mengenai evaluasi kondisi bawah permukaan di sekitar tanggul Sungai Brantas di Desa Lengkong dan Mlirip. Evaluasi diperlukan untuk mengidentifikasi tingkat kerentanan terhadap longsor. Evaluasi daerah rawan longsor tersebut dapat dilakukan dengan metode geofisika.

Metode geofisika merupakan cabang ilmu sains terapam untuk mengetahui kondisi geologi yang berada di kerak bumi. Parameter geofisika tergantung pada lingkungan yang dimana survei dilakukan. Respon parameter kemudian akan memberikan sifat-sifat fisis dari tanah. Salah satu aplikasi geofisika adalah membahas mengenai lingkungan, yaitu longsor pada tanggul. Metode geofisika yang dapat digunakan untuk evaluasi mengenai tanggul yang rawan terhadap longsor adalah metode resistivitas (metode tahanan jenis).

Prinsip dasar metode resistivitas adalah penggunaan arus untuk menginvestigasi sifat listrik (tahanan jenis) dari bawah permukaan. Pengukuran resistivitas dilakukan dengan menginjeksi arus menggunakan dua elektroda (disebut elektroda arus) dan mengukur beda potensial dari dua elektroda lainnya, yang disebut elektroda potensial. Dengan mengetahui nilai arus dan beda potensial, maka nilai tahanan jenis atau resistivitas dapat diketahui. Nilai resistivitas dari pengukuran ini disebut dengan resistivitas semu (*apparent resistivity*). Penggunaan metode tersebut cukup luas karena cepat dan murah untuk memberikan informasi bawah permukaan (Mainali, 2006).

Berdasarkan hasil pengukuran informasi mengenai rata-rata resistivitas bawah permukaan tertentu diperoleh. Perubahan jarak antar elektroda menyebabkan perubahan volume bawah permukaan, dan informasi berdasarkan perbedaan nilai kedalaman dapat diperoleh. Hubungan antara jarak spasi dengan penetrasi kedalaman adalah hal yang penting untuk dipertimbangkan pada metode resistivitas (Sjodahl, 2006). Di dalam metode resistivitas terdapat beberapa konfigurasi atau susunan elektroda, yaitu pole-pole, dipole-dipole, pole-dipole, Wenner, Schlumberger, dan Wenner-Schlumberger. Penggunaan konfigurasi tersebut disesuaikan dengan apa yang akan dicari atau ditentukan pada saat survei geofisika akan dilakukan.

Metode resistivitas merupakan salah satu metode geofisika yang sensitif terhadap perubahan lensa tanah dan efektif untuk menentukan kedalaman untuk daerah air jenuh dan pola aliran air tanah. Terdapat beberapa hal yang memengaruhi resistivitas tanah, antara lain saturasi, porositas, permeabilitas, kandungan ion dari fluida, dan kandungan lumpur (Aal, 2004). Berdasarkan Sjodahl (2006), metode resistivitas dapat digunakan untuk menentukan adanya perubahan yang terjadi di dalam tanggul sungai.

Penelitian tanggul Sungai Brantas di Mojokerto yang rawan terhadap longsor, belum pernah dilakukan sebelumnya. Penelitian yang membahas mengenai longsor tanggul diantaranya dilakukan oleh Warnana (2008) yang membahas *scouring* sebagai potensi kelongsoran tanggul Sungai Bengawan Solo dengan metode GPR di Tuban. Kemudian Mori (2009) yang membahas penggunaan metode GPR dan resistivitas untuk menilai tingkat keamanan pondasi tanggul,

Aitsebaomo *et al.* (2013) yang menuliskan tentang penggunaan metode elektromagnetik untuk survei erosi di tanggul dam, dan Sjodahl (2006), menuliskan tentang investigasi dan monitoring erosi internal dan anomali rembesan di tanggul menggunakan metode resistivitas. Berdasarkan hal-hal tersebut, peneliti ingin melakukan evaluasi terhadap tanggul yang ada di Sungai Brantas Desa Mlirip, Mojokerto. Evaluasi dilakukan dengan menggunakan metode resistivitas konfigurasi Wenner-Schlumberger. Konfigurasi tersebut dipilih karena diharapkan selain memperoleh hasil secara lateral dapat pula diperoleh hasil secara *sounding* (berdasarkan kedalaman) untuk mengetahui karakteristik struktur bawah permukaan. Diharapkan dari penelitian diperoleh hasil yang efektif sehingga mampu menginvestigasi potensi longsor yang ada di tanggul Sungai Brantas Desa Lengkong dan Mlirip Mojokerto. Dengan demikian dapat memberikan informasi kepada masyarakat dan dinas setempat agar lebih waspada terhadap bencana longsor tanggul.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka perumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana hasil evaluasi berdasarkan nilai resistivitas material bawah permukaan dari tanggul Sungai Brantas di Desa Lengkong dan Mlirip, Kecamatan Jetis, Mojokerto menggunakan metode resistivitas konfigurasi Wenner-Schlumberger?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut:

1. Penelitian yang dilakukan adalah evaluasi keamanan terhadap tanggul Sungai Brantas berdasarkan nilai resistivitas bawah permukaan.
2. Penelitian dilakukan di Desa Lengkong dan Mlirip, Kecamatan Jetis, Mojokerto.
3. Penelitian dilakukan di musim penghujan.
4. Metode yang digunakan adalah metode resistivitas konfigurasi Wenner-Schlumberger.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian yang dilakukan adalah melakukan evaluasi terhadap tanggul Sungai Brantas di Desa Mlirip, Kecamatan Jetis, Mojokerto dengan menggunakan metode resistivitas konfigurasi Wenner-Schlumberger berdasarkan nilai resistivitas untuk mengetahui apakah terjadi rembesan dan/atau keretakan tubuh tanggul.

1.5 Manfaat

Hasil dari evaluasi terhadap keamanan tanggul Brantas di Desa Lengkong dan Mlirip, Kecamatan Jetis, Mojokerto ini diharapkan menjadi gambaran mengenai aplikasi dari bidang studi geofisika mengenai lingkungan dan mitigasi bencana. Selain itu, diharapkan pula dijadikan data penunjang untuk penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan longsor pada tanggul, baik untuk di tempat yang sama atau berbeda. Dengan adanya evaluasi ini diharapkan diperoleh hasil atau informasi yang bermanfaat bagi pemerintah atau instansi setempat serta masyarakat sehingga mampu menimbulkan kesadaran bagi semua pihak untuk dapat memelihara dan menjaga lingkungannya (utamanya tanggul sungai). Hal tersebut perlu dilakukan sebagai antisipasi terjadinya longsor tanggul Sungai Brantas Desa Lengkong dan Mlirip, Kecamatan Jetis, Mojokerto yang dekat dengan rumah penduduk dan jalan raya dengan lalu lintas cukup ramai.

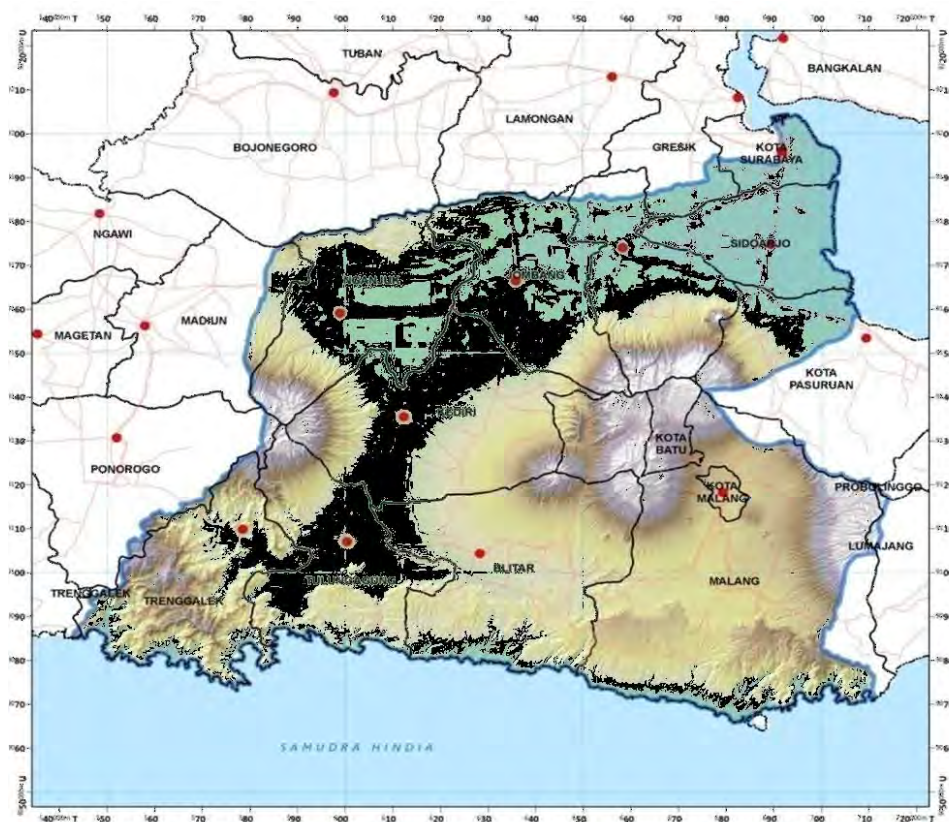
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Kondisi Geologi Sungai Brantas

Wilayah Sungai Brantas merupakan wilayah sungai terbesar kedua di Pulau Jawa, yang terletak di Provinsi Jawa Timur. Koordinat wilayah Sungai Brantas berada di 110⁰30' BT - 112⁰55' BT dan 7⁰01' LS - 8⁰15' LS. Panjang Sungai Brantas lebih kurang 320 km dengan cakupan luas area sekitar 14.103 km². Cakupan luas tersebut mencakup sekitar 25% luas Provinsi Pulau Jawa atau 9% dari luas Pulau Jawa. Batas administrasi wilayah Sungai Brantas terdiri dari 9 kabupaten, yaitu Malang, Blitar, Tulungagung, Trenggalek, Kediri, Nganjuk, Jombang, Mojokerto, dan Sidoarjo. Selain melintasi 9 kabupaten, wilayah Sungai Brantas juga meliputi 6 kota yaitu Batu, Malang, Blitar, Kediri, Mojokerto, dan Surabaya (BBWS Brantas, 2011). Peta wilayah Sungai Brantas ditunjukkan oleh Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Peta Wilayah Sungai Brantas

Daerah aliran Sungai Brantas terbentuk oleh formasi geologi yang terdiri dari, alluvium (terletak di daratan Surabaya, Sidoarjo, Mojokerto, Jombang, Kediri, dan Tulungagung, andesit, miosen fasies batu gamping (tersebar di sebagian Tulungagung, Blitar, dan Malang), miosen fasies batu sedimen, pliosen fasies batu gamping, pliosen fasies batu sedimen (banyak terdapat di Trenggalek, pleistosen fasies gunung api, dan pleistosen fasies batu sedimen (Balai Pengelolaan DAS Brantas, 2003). Berdasarkan Balai Pengelolaan DAS Brantas (2003) juga, kondisi geomorfologi berdasarkan jenis tanah yang terdapat di daerah aliran Sungai Brantas antara lain tersusun atas:

1. Alluvial

Tanah jenis ini termasuk tanah muda yang sifat tanahnya dipengaruhi langsung oleh material asal yaitu alluvium. Morfologi dari material tersebut berupa lapisan-lapisan yang disebabkan adanya pengendapan secara periodik.

2. Litosol

Tanah jenis litosol berupa batu-batu karena material pembentuk merupakan batuan keras yang belum mengalami pelapukan secara sempurna.

3. Latosol

Tanah yang telah mengalami perkembangan lebih lanjut karena terdapat unsur basa, bahan organik, dan silika. Tekstur jenis tanah lempung berpasir, struktur remah hingga gumpal lemah, konsistensi gembur.

4. Gromusol

Tanah yang terbentuk dari material halus berlempung. Tanah ini disebut juga tanah margalith.

5. Regosol

Jenis tanah ini memiliki tekstur yang kasar, struktur remah, dan konsistensi lepas hingga gembur. Tanah regosol belum terbentuk agregat sehingga mudah tererosi oleh angin.

6. Andosol

Tanah ini terbentuk dari abu gunung berapi. Jenis tanah ini berkaitan dengan tanah regosol yang belum mengalami pelapukan.

7. Mediteran

Jenis tanah yang berasal dari pelapukan batu kapur keras dan batuan sedimen. Tanah mediteran merupakan tanah yang kurang subur meskipun cocok ditanami oleh beberapa tanaman palawija. Warna dari tanah ini kemerahan hingga kecoklatan.

2.2 Tanggul Sungai

Sungai merupakan alur atau wadah air alami dan/atau buatan berupa jaringan pengaliran air beserta air yang ada di dalamnya mulai dari hulu hingga muara. Pada sungai terdapat bangunan yang berfungsi sebagai penahan banjir yang terbuat dari timbunan tanah (Peraturan Menteri PU, 2015). Fungsi tanggul yang tercantum dalam Rancangan Pedoman Teknis (RPT) Bahan Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil, membatasi penyebaran aliran dan mengarahkan aliran di hilir. Persyaratan dalam membangun tanggul adalah sebagai berikut:

1. stabil terhadap gaya-gaya yang bekerja,
2. aman terhadap gerusan, rembesan dan erosi, abrasi, benturam, limpasan, dan longsor,
3. stabil terhadap penurunan.

Tanggul yang berada di kedua belah sungai sebisa mungkin harus sejajar. Namun apabila terdapat suatu kondisi dengan ruas sempit maka di hilir ruas tersebut sedapat mungkin diperlebar hingga sesuai dengan lebar normal. Tata letak dalam pembuatan tanggul juga harus diperhatikan. Ketentuan tata letak pembuatan tanggul sungai berdasarkan RPT Bahan Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil adalah sebagai berikut:

1. tanggul harus terletak di daerah dimana terjadi kemungkinan limpasan aliran lahar,
2. tanggul harus terletak pada lokasi dengan biaya pembuatan yang murah, dan
3. apabila tanggul terletak di tikungan sungai, harus melakukan tinjauan hidraulik terhadap berbagai kemungkinan yang akan terjadi.

Berdasarkan Sosrodarsono (1985), beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pembangunan tanggul sungai antara lain:

1. tinggi jagaan yang merupakan tambahan tinggi pada tanggul guna menampung loncatan air dari permukaan sungai akibat ombak ataupun banjir berkisar antara 0,6-2,0 m.
2. kemiringan lereng tanggul yang sangat erat kaitannya dengan infiltrasi air dalam tubuh tanggul. Dalam keadaan tanpa ada perkuatan lereng tanggul direncanakan kemiringan 1 : 2 atau lebih kecil.

Tanah sebagai bahan pembangunan tanggul memiliki karakteristik sebagai berikut:

1. mampu bertahan terhadap gejala gelincir dan longsor pada keadaan jenuh air,
2. tidak mengalami perembesan atau bocor saat banjir,
3. penggalian, transportasi, dan pematatannya mudah,
4. tidak mengalami keretakan yang dapat membahayakan kestabilan tubuh tanggul, dan
5. tidak ada bahan-bahan organik seperti akar-akaran dan rerumputan.

Namun bahan tanah dengan karakteristik seperti yang telah disebutkan sangat sukar diperoleh mengingat tanggul sangat panjang dengan lokasi yang berlainan. Hal ini menyebabkan pengambilan bahan tanah berasal dari lokasi di sekitar tanggul karena apabila pengambilan dilakukan pada lokasi yang sama menyebabkan naiknya biaya transportasi (Sosrodarsono, 1985).

2.3. Kerusakan Tubuh Tanggul

Terdapat beberapa penyebab umum yang menyebabkan rusaknya tubuh tanggul. Penyebab-penyebab tersebut berdasarkan Sosrodarsono (1985) antara lain adalah:

1. adanya bidang gelincir yang menerus akibat kemiringan lereng tanggul yang terlalu curam,
2. keruntuhan lereng tanggul yang disebabkan oleh kejenuhan air dalam tubuh tanggul karena adanya rembesan pada saat banjir dan hujan yang terjadi secara terus menerus,
3. adanya kebocoran pada pondasi tanggul,
4. lereng depan tanggul tergerus oleh air sungai,
5. terjadi limpasan air, dan

6. terjadi pergeseran pondasi karena gempa bumi.

Berdasarkan *Department of Environmental Service*, kerusakan fungsi tanggul secara umum terbagi menjadi tiga, yaitu hidraulik, perembesan, dan struktural.

a. Kesalahan hidrolik

Kesalahan hidrolik dari aliran air yang tidak terkontrol disebabkan oleh adanya erosi air pada lereng tanggul. Tanggul alam memang tidak dirancang untuk hal tersebut sehingga sangat rentan mengalami erosi. Kesalahan hidrolik berhubungan secara langsung maupun tidak langsung terhadap hal-hal berikut:

1. *overtopping* (limpasan),
2. erosi gelombang, menyebabkan berkurangnya ketebalan tanggul dan material tanggul,
3. erosi kaki hilir,
4. erosi lereng tanggul yang disebabkan oleh lalu lintas kendaraan.

b. Kesalahan rembesan

Rembesan terjadi melalui tanggul melalui pondasi tanggul tersebut. Rembesan yang tidak terkontrol dapat menyebabkan erosi material tanah dari lereng atau pondasi. Jumlah kesalahan karena rembesan diperkirakan mencapai 40% dari kesalahan fungsi tanggul lainnya. Adanya perembesan juga dapat menyebabkan material lereng tersaturasi sehingga sifat-sifat adhesiv tanah menjadi berkurang begitu pula dengan stabilitasnya.

c. Kesalahan struktural

Kesalahan jenis ini sangat menonjol dan jelas terlihat pada tanggul dam yang besar. Adanya retakan-retakan pada tanggul merupakan tanda ketidakstabilan dan mengindikasikan adanya kesalahan struktural.

Di dalam Narita (2000) dituliskan bahwa terdapat beberapa pola kerusakan tanggul dan kegagalan fungsi tanggul. Hal tersebut dijelaskan pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Penyebab Kegagalan Fungsi Tanggul

Selama masa konstruksi (pembangunan)	a. tekanan air pori meningkat
	b.berkurangnya kekuatan geser yang berpengaruh terhadap stabilitas lereng tanggul
Setelah masa konstruksi (pembangunan)	a. rekahan hidrolik/erosi internal.
	b. tekanan hidrostatik yang meningkat
	c. berkurangnya kekuatan geser/terjadi pelapukan
	d. adanya pemukiman
	e. adanya gempa bumi

2.4 Erosi Internal

Erosi internal adalah penyebab yang seringkali menyebabkan kerusakan tanggul. Erosi ini terjadi saat partikel dalam tanggul atau pondasi tanggul terbawa ke hilir oleh aliran rembesan (Borragan, 2014). Proses erosi internal dapat dibagi menjadi tiga kategori. Salah satu kategori tersebut adalah erosi yang terjadi di dalam tubuh tanggul. Kategori yang lain adalah saat erosi terjadi hanya pada pondasi tanggul dan satu kategori lainnya adalah kasus dimana erosi internal terjadi dari tanggul ke dalam pondasi (Sjodahl, 2006).

Menurut Engemoen (2011), selain tiga kategori di atas terdapat dua kategori lain yaitu, erosi internal ke atau sepanjang kanal dan erosi internal ke saluran pembuangan. Dalam Engemoen (2011) juga membagi erosi internal ke dalam pondasi ke dalam sub kategori kondisi. Kondisi pertama adalah kondisi jalur aliran rembesan melalui tanggul dan tanah pada tanggul ditransportasikan ke pondasi tanpa filter. Kondisi kedua adalah dimana jalur rembesan melalui pondasi yang dapat ditembus dan rembesan memiliki kecepatan sehingga erosi terjadi dan tanah penyusun tanggul pada kontak dengan pondasi menjadi ditransportasikan.

2.4.1 Penyebab Erosi Internal

Berdasarkan Terzghi dan Peck (1948) dalam Sjodahl (2006), ada dua tipe *piping* berbeda yang menyebabkan kerusakan tanggul. Pertama adalah erosi bawah

permukaan. Erosi ini dimulai dengan proses keluarnya air rembesan yang membawa partikel tanah ke hilir. Kedua, terjadi saat tekanan pori menjadi sama atau lebih besar daripada total tekanan yang bekerja pada tanah. Proses kedua ini sering dikaitkan dengan adanya patahan hidrolik. Terdapat empat kategori untuk menggambarkan jenis-jenis erosi internal berdasarkan Engemoen (2011), yaitu:

1. *Piping*

Piping terjadi saat erosi dimulai dari titik rembesan luar dan mengikisnya melalui pondasi, dengan sekeliling tanah terdapat material pendukung untuk menjaga “pipa” terbuka. Empat kondisi diperlukan untuk perkembangan *piping*: (1) kuantitas sumber air jenuh dan kecepatan untuk mengikis material, (2) titik luar rembesan tidak terlindungi, (3) material terkikis pada jalur aliran, dan (4) material mampu mendukung adanya “pipa”.

2. Erosi Maju (*Progressive Erosion*)

Hal ini dapat terjadi saat tanah tidak mampu menopang “pipa”. Partikel tanah terkikis dan menjadi kosong hingga tidak dapat menopang lagi. Mekanisme ini dapat terjadi berulang-ulang hingga menyebabkan erosi yang tidak terkontrol.

3. *Scour*

Scour atau erosi kontak terjadi ketika rembesan memiliki gaya sehingga cukup untuk memindahkan partikel tanah ke area yang tidak terlindungi.

4. *Suffosion*

Suffosion terjadi ketika partikel halus tanah terkikis melalui partikel kasar dan menjadi lebih permeabel.

Berdasarkan Sjodahl (2006), terdapat empat tahapan dari proses terjadinya erosi internal. Empat tahapan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Stage 1-Inisiasi erosi

Erosi di dalam tanggul bermula dari kebocoran, *suffusion*, atau erosi *backward*. Kebocoran dapat disebabkan oleh adanya patahan hidrolik. *Suffosion* terjadi apabila tanah tidak stabil, seperti adanya *gap* dan adanya retakan oleh aliran rembesan. Erosi *backward* terjadi saat rembesan tinggi sehingga menyebabkan pergerakan partikel tanah.

2. Stage 2-Erosi yang kontinyu

Pada inti tengah tanggul, titik luar erosi internal adalah filter. Filter yang sesuai dapat menghentikan proses erosi dengan menangkap partikel tanah.

3. Stage 3-Pembentukan pipa

Bermula akibat adanya kebocoran yang kemudian berkembang tergantung pada bentuk geometrik dan kemampuan mengikis tanah. Di lain pihak jika dimulai dengan erosi mundur perkembangan membentuk pipa dibangun oleh filter.

4. Stage 4-Formasi penembusan

Proses bermula dengan erosi internal yang mungkin berakhir dengan adanya limpasan, bidang gelincir akibat tidak stabilnya lereng dan erosi permukaan.

2.5 Metode Geofisika dan Pengukuran Geofisika

2.5.1 Metode Geofisika

Geofisika merupakan cabang ilmu sains terapan yang mempelajari sifat fisis bumi berupa kondisi geologi yang ada pada kerak bumi. Kerak bumi bersifat non-homogen, karakteristik tersebut juga tercermin dalam observasi geofisika. Prinsipnya terdiri dari perbedaan antara adanya kontras dengan lingkungan sekitar sehingga respon geofisika yang berbeda tergantung pada perbedaan sifat tertentu yang ada pada lingkungan. Pada metode geofisika terdapat banyak metode yang biasa digunakan untuk survei geofisika. Metode-metode tersebut diantaranya adalah gravity, magnetik, geolistrik, elektromagnetik, dan seismik (Mori, 2009).

Metode geofisika merupakan metode *indirect* karena dapat menggantikan bidang pekerjaan lain seperti pengeboran dan penggalian yang merupakan metode *direct*. Oleh karenanya, perpaduan antara dua metode tersebut dibutuhkan karena dengan adanya geofisika lingkungan yang akan diteliti atau digali terlebih dahulu diobservasi baru kemudian dilakukan pengeboran. Hal tersebut akan lebih menghemat pengeluaran dan waktu. Metode geofisika juga dapat digunakan sebagai perlindungan lingkungan (Crookes, 2005).

Seluruh aplikasi metode geofisika berdasarkan pada latar belakang teoritik dan pengalaman. Oleh karenanya dalam mendeskripsikan sifat-sifat dasar tanah menjadi sangat rasional. Berdasarkan Crookes (2005), parameter geofisika tergantung pada lingkungan yang diteliti. Respon yang diberikan adalah berupa sifat fisis dari tanah. Sifat tanah tersebut dianggap memiliki sifat-sifat dasar seperti

kerapatan jenis, kekuatan, kompresibilitas, stabilitas, dan permeabilitas. Sifat-sifat tersebut digunakan untuk melakukan evaluasi bumi atau batuan yang ada di bumi. Keberadaan air juga memengaruhi sifat mekanis-fisis dari tanah sehingga dapat mengubah parameter geofisika. Adanya air dalam tanah disebabkan oleh adanya sifat porositas dan permeabilitas pada lingkungan dan sifat kimia-fisika lainnya.

2.5.2 Pengukuran Geofisika Sebagai Evaluasi Keamanan Tanggul

Keberadaan tanggul sungai adalah sangat penting bagi kehidupan manusia agar terhindar dari bencana banjir akibat luapan sungai. Dengan menggunakan metode yang cukup kompleks pada daerah pengukuran dan data yang menampilkan respon batuan terhadap parameter terukur, kondisi material yang melindungi tanggul dapat digambarkan. Struktur dan material bangunan seharusnya membuat tubuh tanggul aman. Material bangunan yang digunakan harus memenuhi syarat stabil dan memiliki sifat impermeabel terhadap tanggul sendiri. Hal lain yang perlu diperhatikan adalah jumlah air yang terkandung terutama dalam kaitannya terhadap air pada aliran air permukaan. Selain air yang terkandung, pengetahuan mengenai keberadaan dan posisi zona non-homogen adalah masalah mengenai bahaya dan resiko hidrolik terutama apabila tanggul sungai telah berumur cukup tua. Keberadaan zona lemah juga perlu diteliti sehingga memberikan deskripsi secara stratigrafik dan deteksi segala kejadian non-homogen di dalam tanggul sendiri.

2.6 Metode Resistivitas (Tahanan Jenis)

2.6.1 Teori Dasar

Metode resistivitas adalah metode geofisika yang menggunakan arus untuk investigasi sifat kelistrikan bawah permukaan bumi. Permukaan daerah yang dimana survei dilakukan berdasarkan prinsip bahwa distribusi potensial listrik di sekitar arus yang dibawa oleh elektroda tergantung pada resistivitas listrik dan distribusi di sekitar tanah dan batuan.

2.6.1.1 Resistivitas Sebenarnya (*True Resistivity*) dan Resistivitas Semu (*Apparent Resistivity*)

Diasumsikan terdapat sebuah kubus uniform yang dialiri listrik dengan panjang L melalui arus I (ditunjukkan oleh Gambar 2.2). Material di dalam kubus

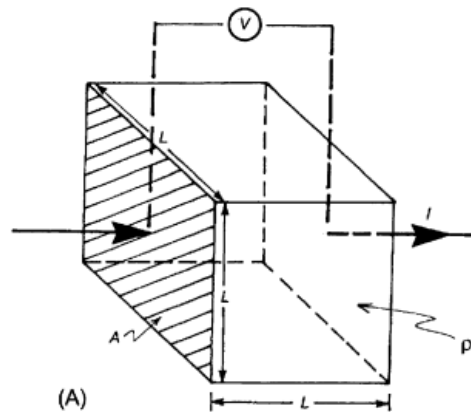
menahan konduksi dari listrik yang melaluinya, sehingga menghasilkan potensial V . Nilai resistansi R sebanding dengan panjang L dari material resistif dan berkebalikan terhadap luas area A , konstanta yang sebanding dengan resistansi adalah resistivitas sebenarnya (*true resistivity*). Persamaan matematisnya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$R = \rho L / A \quad (2.1)$$

karena $R = V / I$, maka nilai resistivitas dapat dituliskan sebagai

$$\rho = \frac{VA}{IL} \quad (2.2)$$

dengan satuan ohm/meter.



Gambar 2.2 Ilustrasi kubus uniform yang dialiri listrik (Sumber : Reynolds, 1997).

Pada pengukuran dengan metode resistivitas, interpretasi berkaitan dengan asumsi bumi sebagai medium homogen dengan nilai resistivitas konstan. Resistivitas semu adalah nilai yang diperoleh dari hasil nilai resistansi yang diukur (R) dan faktor geometri (K) yang ditentukan oleh konfigurasi elektroda yang digunakan dalam survei pada medium yang tidak homogen. Resistivitas semu juga memiliki satuan ohm/meter (Reynolds, 1997). Semua data lapangan untuk survei resistivitas berupa resistivitas semu. Nilai resistivitas semu diinterpretasikan untuk memperoleh nilai resistivitas sesungguhnya dari tiap lapisan tanah. Nilai resistivitas semu akan mendekati nilai resistivitas yang sesungguhnya apabila jarak spasi antar elektroda semakin kecil.

2.6.1.2 Potensial Dalam Medium Homogen

Diasumsikan aliran arus mengalir dalam medium homogen isotropis. Bila δA adalah elemen permukaan dan J adalah kerapatan arus, maka arus yang melalui δA adalah $J \cdot \delta A$. Hubungan kerapatan arus J dan medan listrik E berdasarkan hukum Ohm adalah

$$J = \sigma E \quad (2.3)$$

dengan E dalam volt/meter dan σ adalah konduktivitas medium dalam siemens/meter.

Medan listrik adalah gradien dari potensial skalar, yang didefinisikan dengan persamaan menurut Telford (1990)

$$E = -\nabla V \quad (2.4)$$

sehingga,

$$J = -\sigma \nabla V \quad (2.5)$$

karena $\nabla \cdot J = 0$, maka

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (2.6)$$

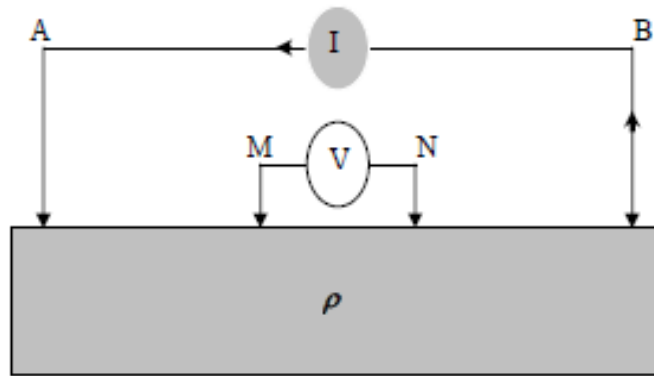
yang dijabarkan menjadi

$$\nabla \sigma \cdot \nabla V + \sigma \nabla^2 V = 0 \quad (2.7)$$

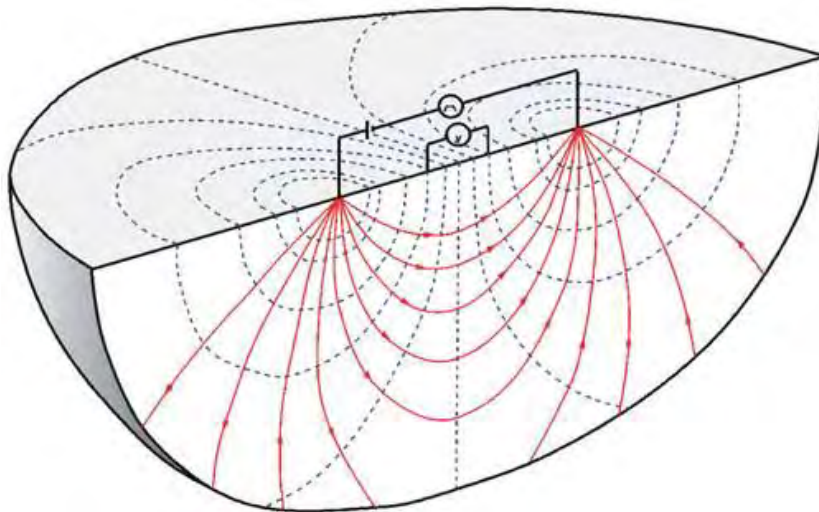
jika σ adalah konstan, maka bentuk pertama dapat diabaikan dan persamaan potensial adalah harmonik

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.8)$$

Pengukuran resistivitas dilakukan dengan mengalirkan arus ke dalam tanah melalui dua elektroda yang dihubungkan ke sebuah sumber. Hasil beda potensial diukur dengan dua elektroda potensial. Medan potensial yang dihasilkan di bawah permukaan tergantung pada dispersi dari nilai resistansi tertentu. Berikut ini adalah susunan elektroda untuk pengukuran resistivitas.



Gambar 2.3 Susunan elektroda yang digunakan untuk survei resistivitas, dimana A, B adalah elektroda arus dan M, N adalah elektroda potensial (Sumber : Mainali, 2006).



Gambar 2.4 Dipole arus (garis merah) dan medan potensial (garis putus-putus) dalam medium homogen (Sumber : Mainali, 2006).

Bila resistansi adalah homogen, maka garis arus listrik dan medan potensial dihasilkan sebagai ilustrasi seperti pada Gambar 2.4. Berdasarkan Mainali (2006), beda potensial (∇V) antara elektroda M dan N diberikan oleh persamaan berikut:

$$\nabla V = V_M - V_N \quad (2.9)$$

dimana,

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (2.10)$$

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (2.11)$$

sehingga

$$\nabla V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (2.12)$$

dimana AM, BM, AN, dan BN menunjukkan jarak geometri antar elektroda A dan M, B dan M, A dan N, dan B dan N. Nilai resistivitas dapat dihitung menggunakan

$$\rho = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \left(\frac{\nabla V}{I} \right) = K \frac{\nabla V}{I}$$

(2.13)

dimana,

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \quad (2.14)$$

K merupakan koefisien geometrik yang tergantung pada susunan empat elektroda A, B, M, dan N.

2.6.2 Konfigurasi Elektroda

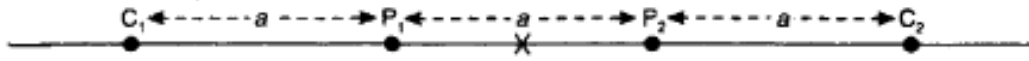
Nilai resistivitas semu tergantung pada geometri susunan elektroda yang digunakan. Susunan elektroda yang biasa digunakan dalam survei di antaranya Wenner, Schlumberger, dipole-dipole, Wenner-Schlumberger, pole-pole, dan pole-dipole. Pemilihan susunan atau konfigurasi elektroda tergantung pada apa yang akan dicari atau diinvestigasi, kondisi medan, dan sensitivitas dari alat *resistivity meter*. Sensitivitas dari susunan elektroda diperkirakan dari beda potensial yang diukur dari perubahan dalam resistivitas. Secara umum, sensitivitas yang tinggi diperoleh dari elektroda terdekat (Mori, 2009). Berikut adalah deskripsi dari masing-masing susunan elektroda.

1. Konfigurasi Wenner

Konfigurasi yang paling populer digunakan dalam survei. Nilai resistivitas semu untuk konfigurasi ini dituliskan sebagai:

$$\rho = 2\pi a (\Delta V/I) \quad (2.15)$$

Walau memiliki geometri yang sederhana namun untuk pengambilan data di lapangan konfigurasi ini cukup merepotkan.

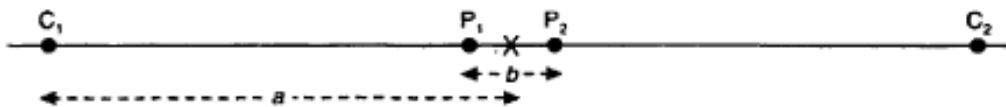


Gambar 2.5 Susunan elektroda untuk konfigurasi Wenner (Sumber : Reynolds, 1997).

2. Konfigurasi Schlumberger

Konfigurasi ini menghasilkan resolusi yang tinggi secara vertikal. Oleh karenanya konfigurasi Schlumberger digunakan untuk survei *sounding*. Nilai resistivitas semunya adalah

$$\rho = \frac{\pi a^2}{b} \left[1 - \frac{b^2}{4a^2} \right] R \quad (2.16)$$

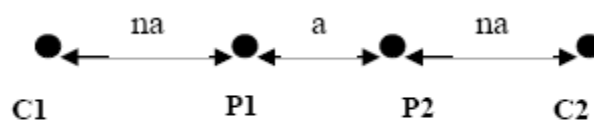


Gambar 2.6 Susunan elektroda konfigurasi Schlumberger (Sumber : Reynolds, 1997)

3. Konfigurasi Wenner-Schlumberger

Konfigurasi ini sensitif baik untuk struktur horizontal maupun vertikal. Nilai resistivitas semu untuk konfigurasi Wenner-Schlumberger adalah

$$\rho = \pi n (n+1) a R \quad (2.17)$$



Gambar 2.7 Susunan elektroda konfigurasi Wenner-Schlumberger (Sumber : Priambodo, 2011).

4. Konfigurasi Pole-pole

Konfigurasi ini menggunakan satu elektroda arus dan satu elektroda potensial. Nilai resistivitas semunya ditentukan oleh persamaan yang sama dengan konfigurasi Wenner.

5. Konfigurasi Pole-Dipole

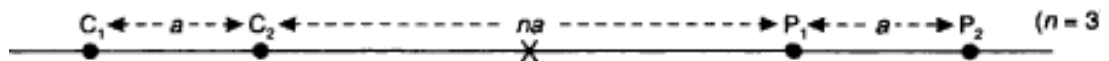
Konfigurasi pole-dipole cukup baik untuk meng-cover secara horizontal namun tidak sensitif terhadap noise telurik seperti konfigurasi pole-pole. Nilai resistivits semunya adalah

$$\rho = \pi n (n+1) aR \quad (2.18)$$

6. Konfigurasi Dipole-dipole

Pada konfigurasi ini di antara elektroda tiap pasangan dipole menghasilkan sensitivitas terhadap perubahan nilai resistivitas. Konfigurasi ini sensitif terhadap perubahan secara horizontal namun tidak untuk vertikal. Resistivitas semunya ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$\rho = \pi n (n+1)(n+2) aR \quad (2.19)$$



Gambar 2.8 Susunan elektroda konfigurasi dipole dipole (Sumber : Reynolds, 1997).

2.6.3 Prosedur Lapangan Survei Resistivitas

Ada dua jenis survei yang dilakukan di lapangan. Pertama untuk menentukan kedalaman (untuk menentukan variasi secara vertikal) yang disebut dengan VES (*vertical electrical sounding*). Kedua, untuk menentukan variasi secara horizontal yang disebut dengan *electrical resistivity transversing* (ERT).

1. VES (*Vertical Electrical Sounding*)

VES merupakan metode yang memberikan variasi resistivitas semu dengan kedalaman untuk lapisan horizontal dengan mengambil sejumlah pengukuran pada *common midpoint*. Resistivitas yang dihitung diplot sebagai fungsi jarak pisah antar elektroda untuk menghasilkan kurva *sounding*. Di dalam aplikasinya, metode ini harus dikalibrasi dengan tes *borehole* (Mori, 2009). Konfigurasi Wenner sangat

terkenal namun untuk kecepatan dan kemudahan dalam akuisisi data, konfigurasi Schlumberger lebih dipilih. Pada prinsipnya, konfigurasi Schlumberger memindahkan elektroda terluar saja tetapi nilai tegangan atau beda potensial akan menjadi sangat kecil untuk diukur kecuali jika elektroda bagian dalam juga dipindahkan (Milsom, 2003). Metode ini berguna untuk menentukan kedalaman dari tanah yang lapuk dan kedalaman dan struktur dari lapisan sedimentasi (Telford, 1990).

2. ERT (*Electrical Resistivity Transversing*)

Metode ini disebut pula sebagai metode *lateral profiling* karena digunakan untuk mendeteksi perubahan secara lateral. Parameter konfigurasi adalah menjaga agar konstan dan kedalaman penetrasi berubah hanya dengan perubahan lapisan bawah permukaan.. Dalam pemilihan konfigurasi untuk *lateral profiling* ini adalah menggunakan metode yang paling mudah dipindahkan. Konfigurasi Wenner dan dipole-dipole dapat digunakan untuk survei secara lateral ini (Milsom, 2003). Aplikasi dari metode *lateral profiling* ini dapat digunakan untuk eksplorasi mineral dan pencarian benda-benda arkeolog (Telford, 1990).

2.6.4 Noise Pada Survei Resistivitas

Noise pada resistivitas semu terjadi hampir seluruhnya terjadi saat pengukuran beda potensial, batas akhir menjadi ditentukan oleh sensitivitas voltmeter. Penyebab noise juga dapat berasal dari induksi dalam kabel yang divariasikan terhadap waktu. Jarak spasi yang terlalu lebar dan kabel yang panjang sebisa mungkin dihindari, tetapi metode untuk meningkatkan *signal to noise ratio* adalah dengan menambah kuat sinyal. Terdapat batasan fisis untuk sejumlah arus yang dihasilkan alat untuk dapat memberikannya ke dalam tanah dan penting untuk memilih konfigurasi yang memberikan potensial besar untuk aliran arus yang diberikan seperti yang telah ditentukan oleh faktor geometri. Apabila jarak pada elektroda tetap 30 kali jarak pisah dipole, dua elektroda potensial menjadi lebih dari 150 kali dari susunan gradien untuk arus yang sama. Bagaimana pun, kabel potensial lebih pendek dan menjadi lebih muda diatasi dan rentan terhadap noise induktif (Milsom, 2003).

2.6.5 Aplikasi Metode Resistivitas

Metode resistivitas telah digunakan untuk berbagai tujuan baik untuk teknik maupun lingkungan. Dalam perkembangannya, prosesing data telah menghasilkan hasil dengan resolusi yang meningkat dan harga untuk melakukan survei semakin menurun. Berikut ini adalah berbagai aplikasi dari metode resistivitas untuk bidang teknik dan lingkungan berdasarkan Sjudahl (2006).

1. Survei hidrogeologi, air tanah
Contoh aplikasinya adalah delineasi sumber air tanah sebagai kontrol perlindungan dan kontaminasi, pemetaan intrusi air asin di area pesisir, dan pemetaan polusi dan kontaminan *plumes*.
2. Survei pada tempat pembuangan limbah/sampah
Contoh aplikasinya delineasi kontaminasi *plumes* dan monitoring terhadap tempat pembuangan limbah.
3. Survei pada tanggul
Contoh aplikasinya sebagai status kontrol keberadaan tanggul, monitoring dan deteksi rembesan air.
4. Survei tanah longsor
Contoh aplikasinya delineasi potensi longsor, monitoring kondisi lengas tanah dan kandungan air sebagai langkah awal mitigasi bencana.
5. Survei untuk bidang teknik sipil
Contoh aplikasinya adalah investigasi semua jenis proyek teknik sipil, pemetaan *bedrock*, air tanah, patahan, dan lain sebagainya.
6. Survei pada *permafrost*
Contoh aplikasinya, pemetaan ketebalan permafrost.
7. Survei untuk bidang lain
Contoh aplikasinya antara lain, investigasi geotermal, investigasi benda arkeolog, mineral, dan benda logam, serta aplikasi untuk medis.

2.7 Sifat Kelistrikan Batuan

Keberhasilan metode resistivitas dipengaruhi oleh sejumlah faktor. Faktor seperti resolusi vertikal dan horizontal, *signal to noise ratio*, dan kesemuanya bergantung pada situasi dan kondisi lapangan yang disurvei. Kondisi yang

dibutuhkan adalah kontras sifat fisis antara material bawah permukaan yang akan digambarkan. Oleh karenanya penting untuk mengetahui sifat kelistrikan dari material yang diinvestigasi. Resistivitas dari tanah dan batuan alam bervariasi dalam rentang yang sangat luas dan perbedaan tersebut di dalam resistivitas adalah dasar pondasi untuk penggambaran dari survei resistivitas. Penginterpretasian nilai resistivitas hasil pengukuran tidak boleh secara langsung digunakan untuk mengetahui material tertentu tanpa adanya pengetahuan atau data tambahan dari kondisi lapangan (Sjodahl, 2006).

Pengukuran sifat listrik batuan dan mineral dilakukan dengan dua cara, yaitu pengukuran di laboratorium dan pengukuran konstanta dielektrik. Seperti yang tertulis pada Sjodahl (2006), diketahui bahwa semua nilai resistivitas batuan dan mineral menunjukkan variasi dengan rentang yang lebar. Sementara rentang densitas, kecepatan gelombang elastis, dan kandungan radioaktif cukup sempit. Konduktor didefinisikan sebagai material yang memiliki nilai resistivitas kurang dari $10^{-5} \Omega \text{m}$. Sementara isolator memiliki nilai resistivitas lebih dari $10^7 \Omega \text{m}$. Rentang di antara nilai tersebut merupakan material semikonduktor. Logam dan grafit adalah material konduktor yang terdiri dari sejumlah elektron bebas. Material semikonduktor juga terdapat elektron bebas namun jumlahnya lebih sedikit. Sementara isolator tidak terdapat elektron bebas (Telford, 1990).

Berdasarkan Sjodahl (2006), konduksi listrik di dalam material geologi adalah bahan elektrolit. Mineral pembentuk tanah dan batuan yang paling umum adalah insulator dalam keadaan kering dan dengan demikian jumlah air dan sifat-sifat air sangat menentukan resistivitas. Untuk batuan padat, normalnya merupakan material isolator. Di lain sisi, tanah merupakan media berpori dari partikel yang solid, atau butiran dan pori-pori di antaranya. Butiran tanah merupakan isolator listrik dan konduksi dikonsentrasikan ke ruang berpori yang terisi seluruh atau sebagian oleh air. Variasi resistivitas beberapa mineral dapat ditunjukkan oleh Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Nilai resistivitas beberapa tanah/batuan/air

Tanah/batuan/air	Rentang nilai resistivitas (Ωm)
Tanah lempung	1-100
Batuan pasir (<i>sandstones</i>)	1-500
Marls (batu lumpur)	3-70
Tanah lanau, pasiran	15-150
Tanah lanau	10-200
Lempung, pasiran (<i>clayely sand</i>)	30-500
Pasir, kerikil	30-225
Kerikil (tersaturasi)	100
Air tanah	0,5-300
Air laut	0,2
Batu kapur	$5 \times 10 - 10^7$
Alluvium dan pasir	$10-8 \times 10^2$

Sumber : Telford (1990) dan Reynolds (1997)

2.8 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Resistivitas

Hal-hal tersebut memengaruhi nilai resistivitas listrik antara lain distribusi ukuran partikel, porositas, derajat saturasi (kandungan air), resistivitas fluida (konsentrasi zat terlarut) dan temperatur. Nilai resistivitas dari tanah tersaturasi sensitif terhadap porositas. Resistivitas dari *solid matrix* adalah hasil konduktansi elektron melalui kontak antar butiran pasir akuifer. Konduksi listrik pada pasir dan *gravel* terjadi pada cairan yang terkandung dalam pori. Pada tanah berlumpur, konduksi terjadi di dalam pori dan permukaan dari lumpur bermuatan listrik. Untuk tanah berlumpur, konduktansi permukaan dapat memengaruhi bulk resistivitas tanah. Kandungan ionik di dalam fluida juga dapat menentukan nilai resistivitas listrik. Resistivitas memiliki nilai yang berbeda antara sedimen tak jenuh, seperti *gravel* halus dan *silt* yang umumnya lebih besar daripada sedimen yang sama namun dalam kondisi jenuh.

Dengan bertambahnya presentase partikel halus dalam tanah berpasir, resistivitas memengaruhi dengan tiga cara. Pertama, porositas akan berkurang

karena partikel halus akan menempati daerah kosong antara butiran pasir dan berkurangnya tingkat porositas memengaruhi bertambahnya nilai resistivitas. Kedua, keberadaan partikel halus dalam tanah umumnya menandakan adanya mineral lumpur yang akan menghasilkan nilai resistivitas yang kecil. Ketiga tanah dengan partikel halus yang tinggi juga umumnya memiliki spesifik permukaan yang tinggi pula yang meningkatkan nilai konduktansi (Sjodahl, 2006).

2.9 Teori Inversi, Sensitivitas, dan *Finite Element Modelling* (FEM)

2.9.1 Teori Inversi

Dalam geofisika diperlukan metode inversi untuk memperoleh sebuah model dengan respon yang sama seperti nilai pengukuran. Model tersebut merupakan representasi secara matematis dari suatu bagian bumi yang memiliki seperangkat parameter untuk memperkirakan data yang diamati. Respon model yang diberikan adalah data sintetik yang dapat dihitung dari hubungan matematika yang mendefinisikan model seperangkat parameter yang diberikan. Keseluruhan metode inversi digunakan untuk menentukan sebuah model bawah permukaan yang memiliki respon sesuai dengan data terukur yang dikenai batasan-batasan tertentu. Di dalam metode berbasis sel yang digunakan program RES2DINV dan RES3DINV, parameter model adalah nilai resistivitas dari model sel, sementara data adalah nilai resistivitas semu terukur. Dalam pemodelan resistivitas baik berupa 2-D maupun 3-D, metode matematika yang digunakan untuk mengetahui hubungan antara parameter dan respon model adalah metode *finite-difference* atau *finite-element* (Loke, 2004).

Hubungan antara data dengan parameter model secara umum dapat dinyatakan oleh persamaan

$$\mathbf{d} = \mathbf{F}(\mathbf{m}) \quad (2.20)$$

Persamaan tersebut digunakan untuk menyatakan hubungan antara data dengan parameter model yang direpresentasikan oleh suatu fungsi non linier. Dalam hal ini \mathbf{F} adalah suatu fungsi pemodelan ke depan (*forward modelling*) yang merupakan fungsi non-linier dari parameter model. Fungsi \mathbf{F} dinyatakan dalam notasi vektor yang berasosiasi dengan komponen data. Jika persamaan tersebut dituliskan kembali dalam bentuk komponen maka diperoleh

$$d_i = F_i(m) \quad (2.21)$$

Solusi inversinya dari permasalahan forward persamaan (2.21) misal dituliskan sebagai

$$d_i^{obs} = F_i(m^*) \quad (2.22)$$

Bila *forward problem* adalah linier, cara standar dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan di atas untuk m^* . Apabila *forward problem* adalah non-linier, digunakan solusi estimasi $m_0^{(j)}$ untuk memperoleh data prediksi (data perhitungan). Model estimasi tersebut $m_0^{(j)}$ diperturbasi dengan δm_j agar diperoleh kecocokan yang lebih baik antara respon model dengan data sehingga diperoleh persamaan

$$d_i^{obs} = F_i(m_0^{(j)} + \delta m_j) \quad (2.23)$$

Dengan menggunakan ekspansi Taylor orde pertama diperoleh bentuk

$$d_i^{obs} = F_i(m_0^{(j)}) + \frac{\partial F_i}{\partial m_j} \delta m_j + O\left(\|\delta m_j\|^2\right) \quad (2.24)$$

$$d_i^{obs} = F_i(m_0^{(j)}) + F_i^{(1)} \delta m_j + O\left(\|\delta m_j\|^2\right) \quad (2.25)$$

dimana operator $F_i^{(n)}$ adalah n^{th} orde dari turunan Frechet dari $F_i(m^{(j)})$. Turunan Frechet ini merepresentasikan sensitivitas dari $F_i(m)$. Suku pertama adalah komponen turunan parsial fungsi $\mathbf{F}(\mathbf{m})$ terhadap elemen model \mathbf{m} membentuk matriks Jacobi berikut:

$$J_{ij} = \frac{\partial F_i}{\partial m_j} \quad (2.26)$$

dengan mensubstitusi persamaan (2.26) ke persamaan (2.24) diperoleh persamaan

$$d_i^{obs} - F_i(m_0^{(j)}) = J_{ij} \delta m_j \quad (2.27)$$

Bentuk lengkap dalam notasi matriks persamaan (2.27) adalah

$$\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m}_0) = \mathbf{J}_0 \Delta \mathbf{m} \text{ atau } \Delta \mathbf{d}_0 = \mathbf{J}_0 \Delta \mathbf{m}_0 \quad (2.28)$$

dimana \mathbf{J}_0 adalah matriks Jacobi yang dievaluasi pada $\mathbf{m} = \mathbf{m}_0$. Persamaan bentuk matriks tersebut mirip dengan persamaan yang berlaku pada hubungan linier antara data dengan parameter model $\mathbf{d} = \mathbf{G}\mathbf{m}$. Dalam hal ini dapat dikatakan bahwa data digantikan oleh pertubasi data dan model menjadi pertubasi model. Sementara

matriks kernel \mathbf{G} digantikan oleh matriks Jacobi \mathbf{J} . Berdasarkan kemiripan tersebut, dapat dibuat analogi solusi inversi dalam bentuk $\Delta \mathbf{m}_0$ berikut:

$$\Delta \mathbf{m}_0 = [\mathbf{J}_0^T \mathbf{J}_0]^{-1} \mathbf{J}_0^T (\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m}_0)) \quad (2.29)$$

Persamaan (2.29) diperlukan agar diperoleh model yang lebih baik yaitu

$\mathbf{m} = \mathbf{m}_0 + \Delta \mathbf{m}_0$. Respon model \mathbf{m} diharapkan lebih mendekati data pengukuran.

Agar diperoleh solusi inversi atau model optimum diperlukan iterasi pada model awal \mathbf{m}_0 . Dengan demikian pada iterasi ke- $(n+1)$ pertubasi dilakukan terhadap model hasil iterasi sebelumnya dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\mathbf{m}_{n+1} = \mathbf{m}_n + [\mathbf{J}_n^T \mathbf{J}_n]^{-1} \mathbf{J}_n^T (\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m}_n)) \quad (2.30)$$

Persamaan (2.30) disebut dengan penyelesaian inversi metode Gauss-Newton. Persamaan tersebut menyatakan bahwa model ke- n di-*update* dengan suatu faktor koreksi. Faktor koreksi tersebut beroperasi pada selisih antara data pengukuran dengan respon model pada iterasi ke- n . Namun model yang dihitung dengan menggunakan persamaan (2.30) memiliki nilai yang tidak realistis karena nilai komponen yang sangat besar pada awal iterasi. Oleh karenanya digunakan solusi berupa metode kombinasi antara dua metode yaitu metode Gauss-Newton dan metode gradien atau metode *steepest descent*. Metode kombinasi antara Gauss-Newton dengan gradien disebut dengan metode Levenberg-Marquardt yang dinyatakan dengan persamaan

$$\mathbf{m}_{n+1} = \mathbf{m}_n + [\mathbf{J}_n^T \mathbf{J}_n + \lambda^2 \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{J}_n^T (\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m}_n)) \quad (2.31)$$

dengan λ^2 adalah faktor redaman. Tahapan metode kombinasi ini secara garis besar adalah faktor redaman yang digunakan saat iterasi awal cukup besar sehingga elemen diagonal menjadi dominan. Apabila pertubasi model menghasilkan fungsi obyektif lebih rendah berarti mendekati solusi model dan faktor redaman diperkecil kemudian metode Gauss-Newton digunakan. Namun apabila fungsi obyektif meningkat maka faktor redaman diperbesar kemudian metode gradien yang digunakan.

Metode Levenberg-Marquardt telah berhasil digunakan dalam inversi data resistivitas *sounding* dimana model terdiri dari sejumlah kecil lapisan. Sementara untuk model inversi 2-D dan 3-D, variasi spasial parameter model pada setiap lapisan dari model digunakan untuk menggambarkan distribusi sifat fisis bawah

permukaan. Pada kasus tertentu variasi spasial parameter model diharapkan bernilai tidak terlalu besar sehingga dalam inversi perbedaan nilai parameter model yang saling berdekatan diminimumkan. Dalam hal ini dicari model yang memiliki karakteristik “*flat*” atau “*smooth*” yang tergantung pada operator diferensial yang digunakan untuk menghitung variasi tersebut (Grandis, 2009).

Flatness model **I** dinyatakan dalam notasi matriks sebagai hasil operasi matriks **D** terhadap model **m** berikut:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & . & . & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & . & 0 \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ 0 & . & . & . & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ . \\ . \\ . \\ m_M \end{bmatrix} = \mathbf{D} \mathbf{m} \quad (2.32)$$

Matriks **D** adalah turunan pertama yang menyatakan beda-hingga (*finite-difference*) antara dua nilai yang saling berdekatan secara spasial. Matriks **D** disebut sebagai *flatness matrix*. Sementara untuk *smoothness matrix* merupakan representasi diskret dari operator diferensial atau turunan orde-2 yang dituliskan sebagai berikut:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & . & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & . & 0 \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ 0 & . & . & . & -2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

solusi inversinya adalah

$$\mathbf{m}_{n+1} = \mathbf{m}_n + [\mathbf{J}_n^T \mathbf{J}_n + \lambda^2 \mathbf{D}^T \mathbf{D}]^{-1} \mathbf{J}_n^T [\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m}_n)] \quad (2.34)$$

Sementara solusi inversi atau model optimum pada iterasi ke-*n* untuk inversi berbobot diperoleh dengan memasukkan matriks pembobot ke persamaan (2.30) sehingga menghasilkan

$$\mathbf{m}_{n+1} = \mathbf{m}_n + [\mathbf{J}_n^T \mathbf{R}_e \mathbf{J}_n]^{-1} \mathbf{J}_n^T \mathbf{R}_e (\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m}_n)) \quad (2.35)$$

2.9.2 Sensitivitas

Langkah dasar di dalam solusi inversi non-linier adalah membentuk hubungan antara perubahan model yang diestimasi dan perubahan yang dihasilkan dalam *forward modelling*. Hubungan tersebut bertujuan agar model sesuai atau mendekati data pengukuran. Turunan Frechet adalah penghubung antara perubahan di dalam model dan perubahan di dalam data. Turunan Frechet merupakan fungsi sensitivitas yang merepresentasikan perubahan resistivitas *section* bawah permukaan akan memengaruhi potensial yang terukur. Bentuk umum dari turunan Frechet ini seperti persamaan (2.26). Oleh karenanya turunan Frechet ini dapat direpresentasikan dalam bentuk matriks Jacobi. Perhitungan sensitivitas adalah sebagai berikut:

$$\frac{\partial F_i(m)}{\partial m_j} \approx \frac{F_i(m + \Delta m_j) - F_i(m)}{\Delta m_j} \quad (2.36)$$

Pertubasi *forward response* $F_i(m + \Delta m_j)$ diperoleh dari penyelesaian kembali *forward problem* setelah dipertubasi oleh Δm_j . Untuk kasus resistivitas, berdasarkan Loke (2004) fungsi sensitivitas diberikan dalam bentuk persamaan berikut:

$$\varphi = \frac{\delta\phi}{\delta\rho} = \int_V \frac{1}{4\pi^2} \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{[x^2 + y^2 + z^2]^{\frac{3}{2}} [(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} dx dy dz \quad (2.37)$$

Persamaan tersebut diperoleh dari

$$\delta\phi = \frac{\delta\rho}{\rho^2} \int_V \nabla\phi \cdot \nabla\phi^* d\tau \quad (2.38)$$

Persamaan (2.38) menyatakan perubahan resistivitas memiliki nilai yang konstan di dalam elemen volume $d\tau$. Parameter ϕ dan ϕ^* dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\phi = \frac{\rho}{2\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.39)$$

$$\phi^* = \frac{\rho}{2\pi((x-a)^2 + y^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.40)$$

setelah mendiferensiasi persamaan di atas untuk memperoleh divergensi dan di substitusi ke dalam persamaan (2.38) maka diperoleh persamaan (2.37)

Pada kasus dua dimensi (2-D) untuk lokasi (x,z) tertentu, kontribusi integrasi dari semua titik untuk rentang nilai- y dari $-\infty$ ke $+\infty$ ditambahkan, Fungsi sensitivitas 2-D diberikan oleh persamaan berikut:

$$\varphi_{2D}(x,z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{[x^2 + y^2 + z^2]^{3/2} [(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} dy \quad (2.41)$$

Integral ini memiliki solusi analitik (Loke dan Barker, 1995) yang diberikan dalam bentuk integral elips. Solusi lengkapnya adalah

$$\varphi_{2D} = \frac{2}{\alpha\beta^2} \left[\frac{\alpha^2 E(k) - \beta^2 K(k)}{(\alpha^2 - \beta^2)} - \frac{\gamma[(\alpha^2 + \beta^2)E(k) - 2\beta^2 K(k)]}{(\alpha^2 - \beta^2)} \right] \quad (2.42)$$

dimana,

$$k = \frac{(\alpha^2 - \beta^2)^{0.5}}{\alpha} \quad (2.43)$$

untuk $x > 0.5a$,

$$\alpha^2 = x^2 + z^2, \beta^2 = (x-a)^2 + z^2, \gamma = xa \quad (2.44)$$

untuk $x < 0.5a$

$$\alpha^2 = (x-a)^2 + z^2, \beta^2 = x^2 + z^2, \gamma = a(x-a) \quad (2.45)$$

dan untuk $x = 0.5a$

$$\varphi_{2D}(x,z) = \pi \left[\frac{1}{2\alpha^3} - \frac{3a^2}{16\alpha^5} \right], \text{ dengan } \alpha = 0.25a^2 + z^2 \quad (2.46)$$

Fungsi sensitivitas menunjukkan derajat sejauh mana perubahan nilai resistivitas dari bagian bawah permukaan akan memengaruhi potensial yang diukur. Semakin besar nilainya, pengaruh terhadap bawah permukaan yang diukur juga akan semakin besar (Loke, 2004).

2.9.3 Solusi Finite Element Modelling (FEM)

Konsep dasar dari FEM adalah untuk mendiskretasi domain yang diinvestigasi ke kumpulan elemen yang mana potensial ϕ diaproksimasi dengan

menggunakan fungsi interpolasi linier yang terkait dengan node. Dengan menghimpun tiap elemen maka diperoleh persamaan untuk potensial dalam domain Fourier untuk dua dimensi adalah sebagai berikut:

$$\left[\sum_{i=1}^N \sigma_i (\mathbf{K}_{1i} + k^2 \mathbf{K}_{2i}) \right] \phi = \frac{I}{2} \delta(x - x_s) \delta(z - z_s) \quad (2.47)$$

dimana \mathbf{K}_{1i} dan \mathbf{K}_{2i} adalah matriks finite elemen yang tergantung pada koordinat dari node dan elemen konduktivitas (Karaoulis *et al*, 2013). Persamaan tersebut menunjukkan bahwa tiap finite elemen harus dikombinasikan untuk membentuk sistem persamaan linier. Sistem tersebut memiliki bentuk berikut.

$$\mathbf{K}_{(x,z,\sigma)} \phi_{(x,z,\sigma)} = P_{(x,z,\tau,\Omega)} \quad (2.48)$$

dimana x, y, z adalah koordinat untuk node, σ adalah konduktivitas tiap elemen dan τ, Ω mengindikasikan batas pada permukaan bumi dan yang tidak terbatas. Kemudian ϕ adalah potensial listrik dan P terdiri dari informasi sumber lokasi dan batasan kondisi (Qiang *et al*, 2013).

Diketahui turunan Frechet seperti pada persamaan (2.36). Turunan tersebut direpresentasikan dengan menggunakan matriks Jacobi. Di dalam resistivitas, diasumsikan bahwa resistivitas semu pada permukaan bumi adalah fungsi distribusi konduktivitas. Oleh karenanya turunan Frechet dapat ditulis sebagai berikut.

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial \sigma_j} \quad (2.49)$$

dimana ρ_i adalah resistivitas semu terukur dan σ_j adalah konduktivitas. Seperti yang diketahui bahwa resistivitas semu terukur pada permukaan bumi berhubungan dengan potensial listrik pada variasi posisi, sehingga diperoleh persamaan berikut.

$$\frac{\partial \rho^{ABMN}}{\partial \sigma} = \frac{-G^{ABMN}}{I_{AB}} \left(\frac{\partial \phi_M^A}{\partial \sigma} - \frac{\partial \phi_N^A}{\partial \sigma} - \frac{\partial \phi_M^B}{\partial \sigma} + \frac{\partial \phi_N^B}{\partial \sigma} \right) \quad (2.50)$$

dengan

G^{ABMN} adalah koefisien konfigurasi yang merupakan fungsi dari jarak elektroda, I_{AB} adalah arus yang diinjeksi, ϕ_M^A adalah potensial listrik pada titik M ketika arus diinjeksikan oleh elektroda A, dan seterusnya (Qiang *et al*, 2013). Persamaan tersebut mengindikasikan bahwa turunan dari resistivitas semu terhadap model

konduktivitas dapat ditransformasi menjadi turunan potensial listrik terhadap konduktivitas tiap sel. Potensial listrik dapat dikomputasikan dengan menggunakan persamaan (2.48). Dengan menurunkan satu kali persamaan (2.48) terhadap parameter model, maka dapat diperoleh persamaan:

$$\mathbf{K} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} + \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \sigma} \phi = 0 \quad (2.51)$$

atau dapat dituliskan,

$$\mathbf{K} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} = -\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \sigma} \phi \quad (2.52)$$

Persamaan (2.52) sama seperti persamaan (2.48). Dengan demikian dapat diperoleh solusi persamaan sistem linier untuk memperoleh turunan potensial listrik pada permukaan bumi terhadap konduktivitas di dalam tiap sel. Sebagai contoh adalah turunan ϕ_M^A yang dituliskan oleh persamaan berikut:

$$\frac{\partial \phi_M^A}{\partial \sigma} = -\left\{ \phi_1^A \quad \phi_2^A \quad \phi_3^A \quad \dots \quad \phi_m^A \right\} \left[\begin{array}{cccccc} \frac{\partial k_{11}}{\partial \sigma} & \frac{\partial k_{12}}{\partial \sigma} & \frac{\partial k_{13}}{\partial \sigma} & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial k_{21}}{\partial \sigma} & \frac{\partial k_{22}}{\partial \sigma} & \frac{\partial k_{23}}{\partial \sigma} & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial k_{31}}{\partial \sigma} & \frac{\partial k_{32}}{\partial \sigma} & \frac{\partial k_{33}}{\partial \sigma} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial k_{mm}}{\partial \sigma} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \phi_1^A \\ \phi_2^A \\ \phi_3^A \\ \dots \\ \dots \\ \phi_n^A \end{array} \right\} \quad (2.53)$$

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

3.1.1 Waktu Penelitian

Penelitian untuk mengevaluasi tanggul yang rawan terhadap longsor ini dilakukan pada tanggal 22-24 April 2016.

3.1.2 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian dalam rangka evaluasi tanggul yang rawan terhadap longsor dilakukan di tanggul Sungai Brantas Desa Lengkong dan Mlirip, Kecamatan Jetis, Kabupaten Mojokerto.



Gambar 3.1 Lokasi penelitian pada google earth.



(a)



(b)



(c)



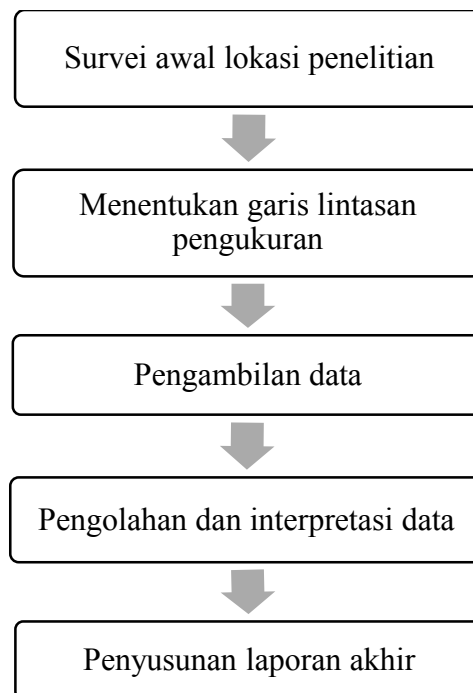
(d)

Gambar 3.2 Lokasi penelitian evaluasi tanggul Sungai Brantas di Desa Lengkong dan Mlirip, Mojokerto (a) lintasan pertama (b) lintasan kedua (c) lintasan ketiga (d) lintasan keempat.

Dalam penelitian yang sifatnya adalah evaluasi tanggul, terdapat empat lintasan yang digunakan pada saat akuisisi data. Dengan panjang lintasan pertama adalah 100 meter, lintasan kedua 200 meter, lintasan ketiga 200 meter, dan lintasan keempat 130 meter. Nilai a dalam konfigurasi Wenner Schlumberger yang merupakan jarak spasi antar elektroda potensial adalah 5 m. Jarak spasi antara elektroda potensial ke elektroda arus sebesar na , dengan $n = 1, 2, 3, \dots$.

3.2 Diagram Kerja Penelitian

Berikut adalah diagram kerja penelitian mengenai evaluasi tanggul Sungai Brantas ini :



Gambar 3.3 Diagram kerja penelitian

3.3 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

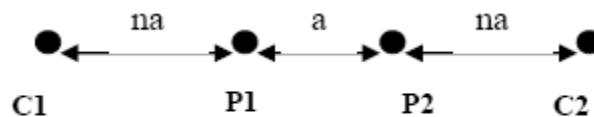
1. Resistivitymeter
2. Elektroda arus dan potensial
3. 4 gulung kabel
4. Aki

5. GPS
6. Palu
7. Meteran
8. Alat tulis

3.4 Prosedur Pengambilan Data

Data dari hasil pengukuran di lapangan adalah berupa arus, tegangan, dan jarak spasi. Langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menentukan panjang tiap lintasan pengukuran
2. Mengukur spasi awal yaitu $a = 5$ m dan ditandai dengan pasak. Pengukuran ini disesuaikan dengan konfigurasi Wenner-Schlumberger. Berikut adalah ilustrasi susunan elektrodanya :



Gambar 3.4 Desain susunan elektroda konfigurasi Wenner-Schlumberger

3. Memasang ke empat elektroda yaitu dua elektroda arus dan dua elektroda potensial di tempat yang sudah ditandai dengan pasak
4. Menghubungkan ke empat elektroda tersebut dengan *Resistivitymeter*
5. Mengaktifkan *Resistivitymeter*, kemudian melakukan injeksi arus listrik dalam tanah
6. Mencatat nilai resistansi
7. Memindahkan posisi elektroda sesuai dengan aturan konfigurasi Wenner Schlumberger kemudian menginjeksikan arus dan mencatat hasilnya. Pemindahan dilakukan terus sampai melengkapi seluruh panjang lintasan.

Pemilihan jarak spasi untuk survei Wenner-Schlumberger mempengaruhi penetrasi kedalaman (Z) yang dicapai. Berdasarkan Loke (1999), penetrasi kedalaman (Z) ditentukan oleh jarak maksimum antar elektroda “a” atau panjang maksimum

lintasan “L”, dengan faktor kedalaman untuk konfigurasi Wenner-Schlumberger ditunjukkan oleh Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Faktor kedalaman konfigurasi Wenner-Schlumberger

Konfigurasi Schlumberger	Wanner	z_e/a	z_e/L
n = 1		0,52	0,173
n = 2		0,93	0,186
n = 3		1,32	0,189
n = 4		1,71	0,190
n = 5		2,09	0,190
n = 6		2,48	0,190

Untuk konfigurasi Wenner-Schlumberger dan konfigurasi lainnya memiliki susunan 4 elektroda aktif akan lebih mudah menentukan penetrasi kedalaman dengan menggunakan panjang lintasan total “L”.

3.5 Pengolahan Data

Dari hasil pengukuran lapangan diperoleh data resistivitas yang kemudian diolah dengan software Res2dinv. Data tersebut terlebih dahulu dikalikan dengan faktor geometri konfigurasi Wenner-Schlumberger untuk memperoleh nilai resistivitas sebenarnya (*true resistivity*) dari bawah permukaan. Nilai resistivitas tersebut ditampilkan dalam bentuk citra warna secara horisontal. Nilai resistivitas tersebut menunjukkan jenis batuan yang ada di lokasi penelitian. Pembacaan nilai resistivitas dapat dilihat pada tabel referensi (Tabel 2.2). Kemudian hasilnya disesuaikan dengan data *sounding* dari Sungai Brantas yang berada pada lembar Lampiran B.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

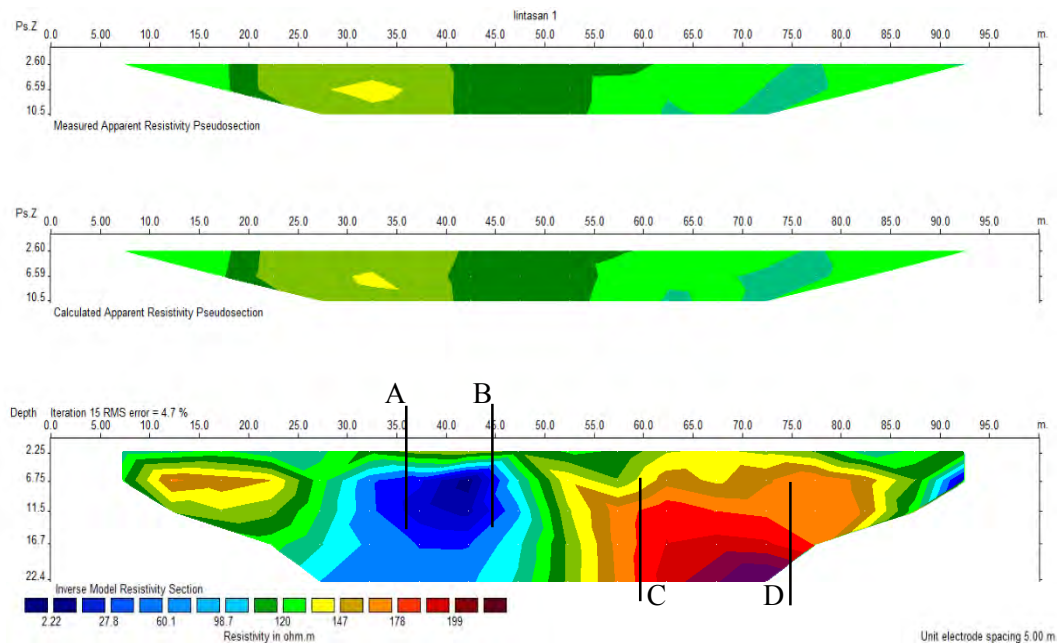
Penelitian untuk mengevaluasi keberadaan tanggul Sungai Brantas di Desa Lengkong dan Mlirip, Mojokerto telah dilakukan pada tanggal 22-24 April 2016. Evaluasi dilakukan dengan menggunakan metode resistivitas konfigurasi Wenner-Schlumberger. Dengan menggunakan konfigurasi tersebut diperoleh karakteristik bawah permukaan sehingga dapat diketahui apakah terdapat anomali berupa rembesan air yang berpotensi terjadi erosi internal. Jarak spasi yang digunakan adalah 5 meter dimana jarak tersebut memengaruhi penetrasi kedalaman yang dicapai. Penelitian yang dilakukan menggunakan empat lintasan dengan panjang yang berbeda-beda karena menyesuaikan kondisi daerah penelitian.

Hasil yang diperoleh dari pengukuran adalah nilai resistansi (R) yang kemudian dilakukan perhitungan sehingga diperoleh nilai resistivitas (ρ). Data resistivitas tersebut kemudian dianalisis kemudian ditafsirkan. Data resistivitas tersebut ditampilkan dalam bentuk kontur yang diperoleh dari hasil inversi dengan *software* Res2dinv. Berdasarkan pengolahan data dengan menggunakan Res2dinv diperoleh tiga *pseudosection* (penampang) 2D. Pertama adalah *pseudosection* resistivitas semu yang menggambarkan nilai resistivitas dari pengukuran. Kedua adalah *pseudosection* resistivitas semu yang telah dikalikan dengan faktor geometri. Ketiga adalah *resistivity section* yang merupakan hasil inversi dari resistivitas semu. Hasil inversi tersebut merupakan *true resistivity* atau resistivitas sebenarnya yang kemudian dapat diinterpretasikan karakteristik bawah permukaannya. Di dalam analisis, hasil penelitian yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan data penelitian lain yang menggunakan metode berbeda, yaitu metode VLF dan data *sounding* dari tanggul. Berikut adalah hasil dan pembahasan masing-masing lintasan.

4.1 Lintasan 1

Lintasan 1 terletak pada latitude S 7° 26.739' hingga S 7° 26.732' dan longitude E 112° 27.951' hingga E 112° 28.003' serta elevasi ± 40 meter di atas

permukaan laut. Lintasan ini terletak di sebelah timur dari bendungan. Panjang lintasan yang digunakan adalah 100 meter. Adapun hasil pengolahan dengan *software* Res2dinv adalah sebagai berikut.



Gambar 4.1 Penampang lintasan 1

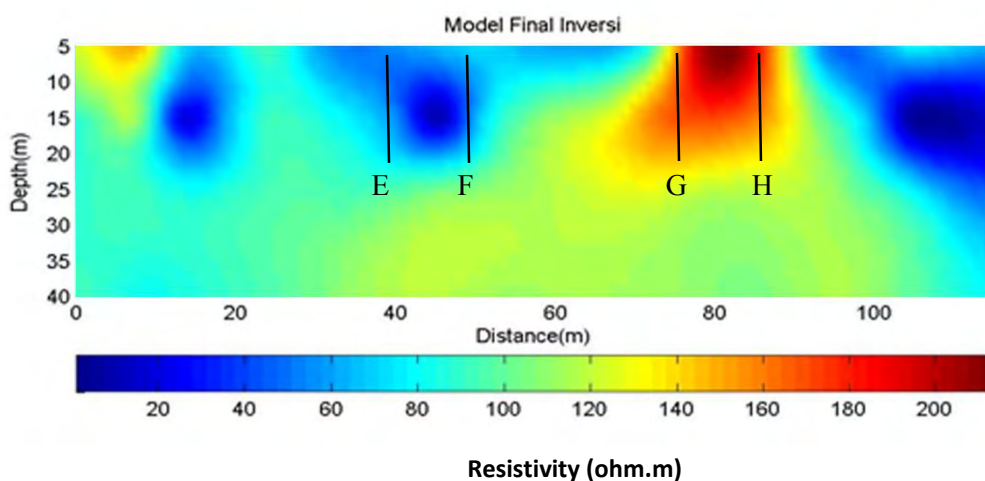
Pengolahan data lintasan 1 menggunakan iterasi sebanyak 15 kali dengan nilai error sebesar 4,7 %. Berdasarkan Gambar 4.1, sumbu-x menunjukkan panjang lintasan dan sumbu-y menunjukkan kedalaman dari bawah permukaan. *Pseudosection* pertama dan kedua menunjukkan nilai resistivitas berkisar antara 120 - 141 ohm meter. Sementara *resistivity section* memiliki range nilai resistivitas 2,22 - 199 ohm meter. Penafsiran nilai resistivitas bawah permukaan lintasan 1 ditunjukkan oleh Tabel 4.1 berikut berdasarkan tabel referensi (Tabel 2.2) dimana pembacaan material tanggul disesuaikan dengan data *sounding* (berada pada lembar Lampiran B) dari daerah penelitian. Pada *resistivity section*, dapat dilihat bahwa terdapat nilai resistivitas yang *overlapping* antara beberapa jenis material. Hal tersebut diduga karena adanya faktor berupa perubahan keadaan jenuh air dan perubahan kadar air.

Anomali terjadi pada lintasan 1 dengan resistivitas tinggi di titik 60 – 75 meter (dapat dilihat pada titik C-D). Anomali tersebut diduga sebagai retakan atau patahan yang tidak berisi apa-apa (hanya udara) sehingga nilai resistivitasnya lebih tinggi

daripada material sekitarnya karena udara menyebabkan arus listrik sulit untuk melewatinya. Kondisi nyata yang terjadi di lapangan (Gambar 4.3) dimulai dari titik 60 meter memperlihatkan retakan yang terjadi di tubuh tanggul. Selain itu, pada titik 35 - 45 meter (titik A-B) terdapat nilai resistivitas rendah. Nilai resistivitas rendah tersebut diduga sebagai rembesan akibat adanya retakan atau patahan yang telah terisi air.

Tabel 4.1 Nilai resistivitas bawah permukaan lintasan 1

No.	Nilai resistivitas (Ωm)	Material
1.	2,22	Air
2.	27,8	Pasir
3.	60,1	Pasir
4.	98,7	Pasir
5.	120	Pasir, kerikil
6.	147	Pasir, kerikil
7.	178	Lempung, pasir
8.	199	Lempung, pasir



Gambar 4.2 Hasil inversi data VLF sebagai data pembanding

Hasil tersebut juga didukung oleh data penelitian lain dengan metode berbeda, yaitu dengan metode VLF yang dilakukan oleh Realita (2016). Pada Gambar 4.2, memperlihatkan bahwa rentang nilai resistivitas adalah 0 – 200 ohm meter. Hasil inversi dengan metode VLF menunjukkan bahwa pada jarak 40-50

meter (titik E-F) terdapat nilai resistivitas rendah yang diduga sebagai retakan berisi air dan pada jarak 70 – 80 meter (titik G-H) terdapat retakan berisi udara pada tubuh tanggul sehingga bernilai resistivitas tinggi dibandingkan material sekitarnya. Berdasarkan hasil penelitian menggunakan resistivitas konfigurasi Wenner-Schlumberger dengan hasil penelitian VLF, menunjukkan bahwa untuk lintasan 1 memiliki nilai resistivitas bawah permukaan berkisar antara 0 – 200 ohm meter. Kemudian titik dimana retakan berisi udara terjadi ditunjukkan oleh kisaran nilai resistivitas yang sama, yaitu sekitar 200 ohm meter, begitu pula dengan rembesan yang terjadi.



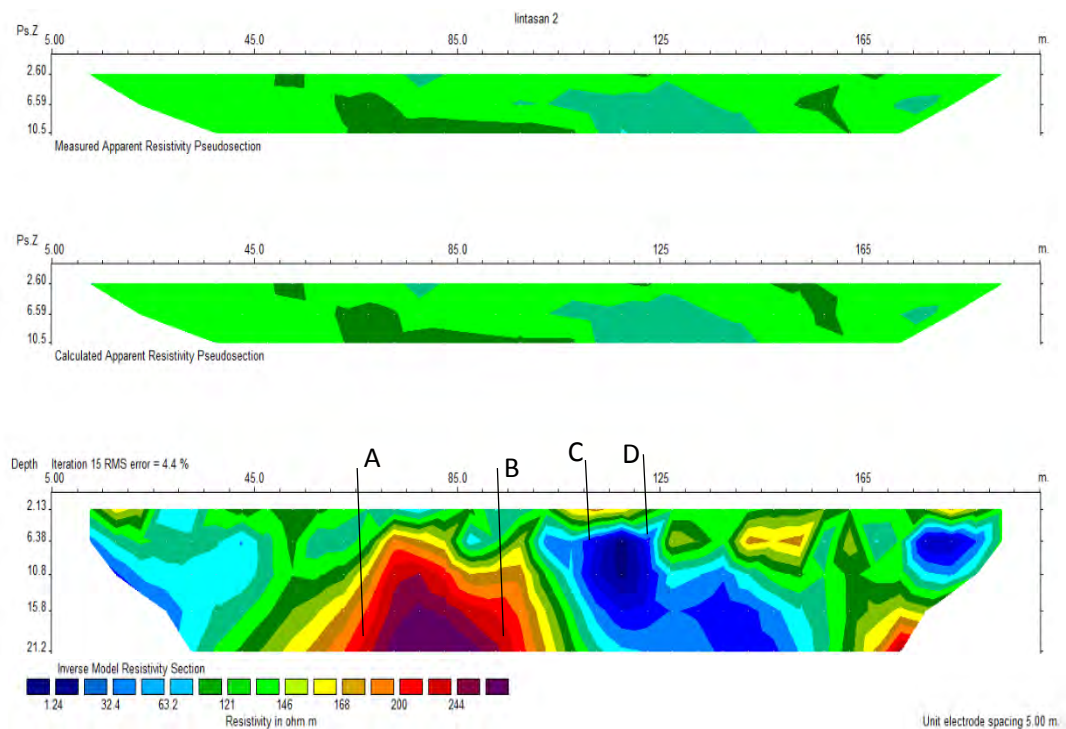
Gambar 4.3 Kondisi plengsengan tanggul yang runtuh

4.2 Lintasan 2

Lokasi lintasan 2 terletak pada koordinat latitude S $7^{\circ} 26.742'$ hingga S $7^{\circ} 26.766'$ dan longitude E $112^{\circ} 27.939'$ hingga E $112^{\circ} 27.834'$ serta elevasi ± 40 meter di atas permukaan laut. Lintasan 2 ini terletak di sebelah barat dari bendungan. Panjang lintasan yang digunakan untuk pengukuran adalah 200 meter. Berikut adalah hasil inversinya.

Berdasarkan Gambar 4.4, pada *pseudosection* pertama dan kedua, nilai resistivitas berada pada 121 ohm meter. Kemudian *resistivity section* menunjukkan bahwa resistivitas berada pada *range* 1,24 - 244 ohm meter. Dengan rentang nilai

resistivitas tersebut maka dapat ditafsirkan material bawah permukaannya berdasarkan Tabel 2.2 yang disesuaikan dengan data *sounding* pada Lampiran B sehingga diperoleh Tabel 4.2. Seperti pada lintasan 1, lintasan 2 memiliki nilai resistivitas yang *overlapping* antara beberapa jenis material. Hal tersebut diduga karena adanya faktor berupa perubahan keadaan jenuh air dan perubahan kadar air.



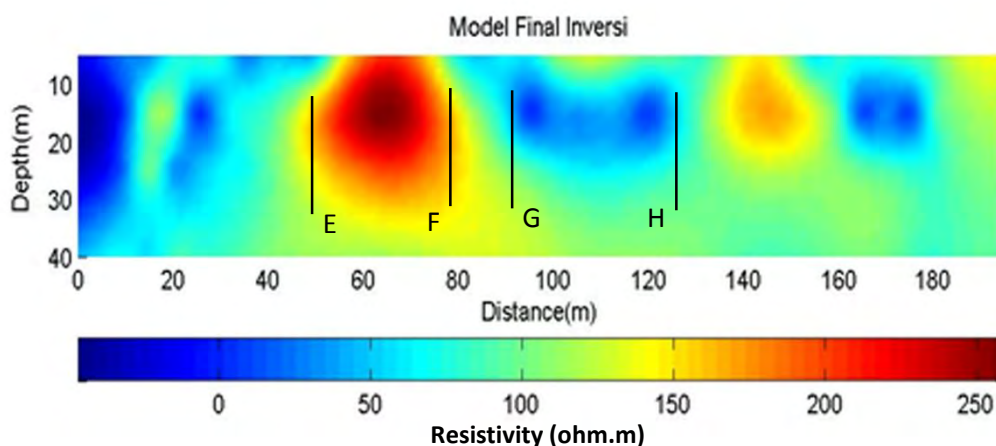
Gambar 4.4 Penampang lintasan 2

Tabel 4.2 Nilai resistivitas bawah permukaan lintasan 2

No.	Nilai resistivitas (Ω m)	Material
1.	1,24	Air
2.	32,4	Pasir
3.	63,2	Pasir
4.	121	Pasir, kerikil
5.	146	Pasir, kerikil
6.	168	Lempung, pasir
7.	200	Lempung, pasir
8.	244	Lempung pasir

Pada lintasan 2, terdapat nilai resistivitas tinggi pada titik 65 – 90 meter (titik A-B) yang diduga sebagai retakan atau patahan berisi udara sehingga bersifat kurang konduktif dibandingkan material di sekitarnya. Retakan tersebut berpotensi akan terjadi rembesan air. Anomali lain ditunjukkan oleh nilai resistivitas rendah di titik 110 - 125 meter (titik C-D) diduga sebagai rembesan air. Hal tersebut karena pada titik-titik tersebut tanggul sudah tidak terbuat dari beton dan material tanah penyusun yang seharusnya kedap air (memiliki permeabilitas rendah) telah mengalami keadaan jenuh sehingga mampu meloloskan air.

Hasil tersebut kemudian dibandingkan dengan data VLF milik Realita (2016) sebagai data pendukung. Berdasarkan Gambar 4.5, diinterpretasikan bahwa pada titik 45 – 80 meter (titik E-F) diduga terdapat retakan kemudian pada titik 95 – 120 meter (titik G-H) yang diduga terdapat rembesan badan tanggul. Hasil penelitian menggunakan resistivitas konfigurasi Wenner-Schlumberger dengan hasil penelitian VLF, menunjukkan bahwa untuk lintasan 2 memiliki nilai resistivitas bawah permukaan berkisar antara 0 – 250 ohm meter. Kemudian titik dimana retakan berisi udara terjadi ditunjukkan oleh kisaran nilai resistivitas yang hampir sama, yaitu sekitar 244 untuk resistivitas konfigurasi Wenner-Schlumberger dan 250 ohm meter untuk VLF, begitu pula dengan rembesan yang terjadi (berada di sekitar 0-5 ohm meter).



Gambar 4.5 Hasil pengolahan data VLF

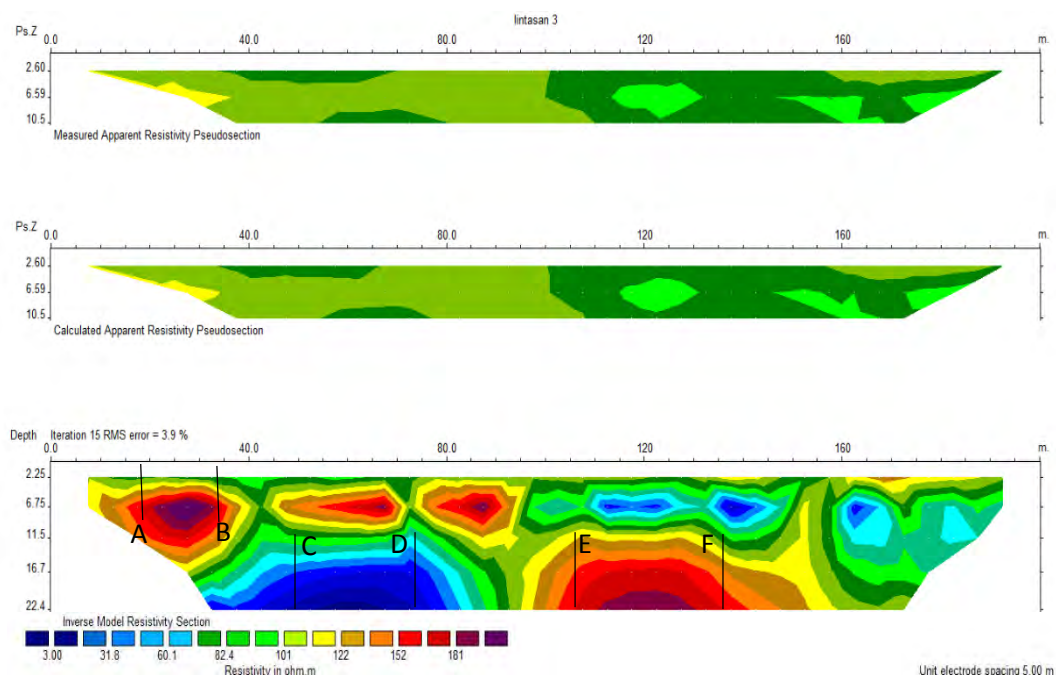


Gambar 4.6 Kondisi lintasan 2 tampak depan

4.3 Lintasan 3

Lintasan 3 terletak pada koordinat latitude S $7^{\circ} 26.642'$ hingga S $7^{\circ} 26.648'$ dan longitude E $112^{\circ} 27.966'$ hingga E $112^{\circ} 28.075'$ dengan elevasi ± 50 di atas permukaan laut. Panjang lintasan yang digunakan adalah 200 meter. Hasil pengolahan dengan *software* Res2dinv ditunjukkan oleh Gambar 4.7. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat bahwa penetrasi kedalaman mencapai 22,4 meter. Jumlah iterasi yang digunakan dalam pengolahan sebanyak 15 kali dengan nilai error sebesar 3,9%.

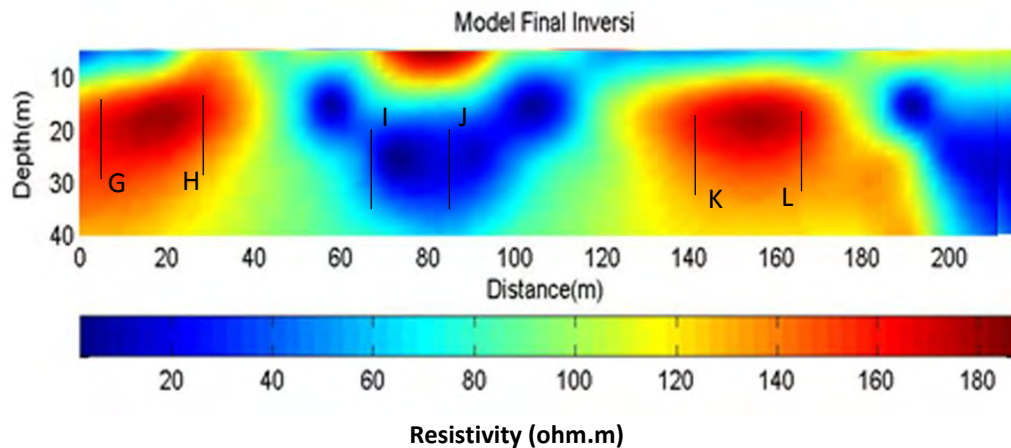
Penampang (*pseudosection*) pertama dan kedua menggambarkan bahwa struktur bawah permukaan memiliki rentang nilai resistivitas 82,4 - 101 ohm meter. Sementara *resistivity section* memiliki rentang nilai resistivitas sebesar 3 - 181 ohm meter. Penafsiran nilai resistivitas lintasan 3 berdasarkan tabel referensi (Tabel 2.2) diperlihatkan oleh Tabel 4.3 yang didukung oleh adanya data log yang terdapat pada lembar Lampiran B. Seperti pada lintasan 1 dan 2, di lintasan 3 terdapat nilai resistivitas yang *overlapping* antara beberapa jenis material yang diduga disebabkan oleh faktor berupa perubahan keadaan jenuh air dan perubahan kadar air.



Gambar 4.7 Penampang lintasan 3

Tabel 4.3 Nilai resistivitas bawah permukaan lintasan 3

No.	Nilai resistivitas (Ω m)	Material
1.	3,00	Air
2.	31,8	Pasir
3.	60,1	Pasir
4.	82,4	Pasir
5.	101	Pasir, kerikil
6.	122	Pasir kerikil
7.	152	Lempung, pasir
8.	181	Lempung, pasir



Gambar 4.8 Pengolahan data VLF

Titik 0 pengukuran di lintasan 3 tidak berada pada bendungan seperti lintasan lain, tetapi berjarak sekitar 25 meter dari bendungan. Hal tersebut dikarenakan saat melakukan pengambilan data terdapat hambatan sehingga sangat tidak memungkinkan untuk mengambil titik 0 pengukuran di dekat bendungan. Hasil penelitian dengan menggunakan metode resistivitas Wenner-Schlumberger diperoleh nilai resistivitas tinggi yang diduga sebagai retakan berisi udara di titik 20 – 35 meter (titik A-B). Kemudian di titik 55 – 75 meter (titik C-D) memiliki nilai resistivitas rendah yang diduga telah terjadi retakan yang telah berisi air. Pada titik 110 – 140 meter (titik E-F) terdapat nilai resistivitas tinggi yang merupakan struktur batuan berongga dengan dugaan sebagai retakan berisi udara. Sebagai bahan perbandingan, berdasarkan data VLF (Gambar 4.8) oleh Realita (2016), dapat dilihat bahwa terjadi retakan atau patahan di sekitar titik 20 meter (titik G-H) dan 140 meter (titik K-L), serta rembesan yang terjadi di titik 60 – 80 meter (titik I-J). Kondisi nyata lintasan 3, pada titik 10 – 40 meter dari titik 0 pengukuran, terjadi keruntuhan tubuh tanggul yang diduga akibat adanya retakan di dalamnya. Keruntuhan tersebut dapat menjadi lebih parah saat hujan turun dalam jangka waktu lama dan deras karena air hujan akan menambah beban tanah.



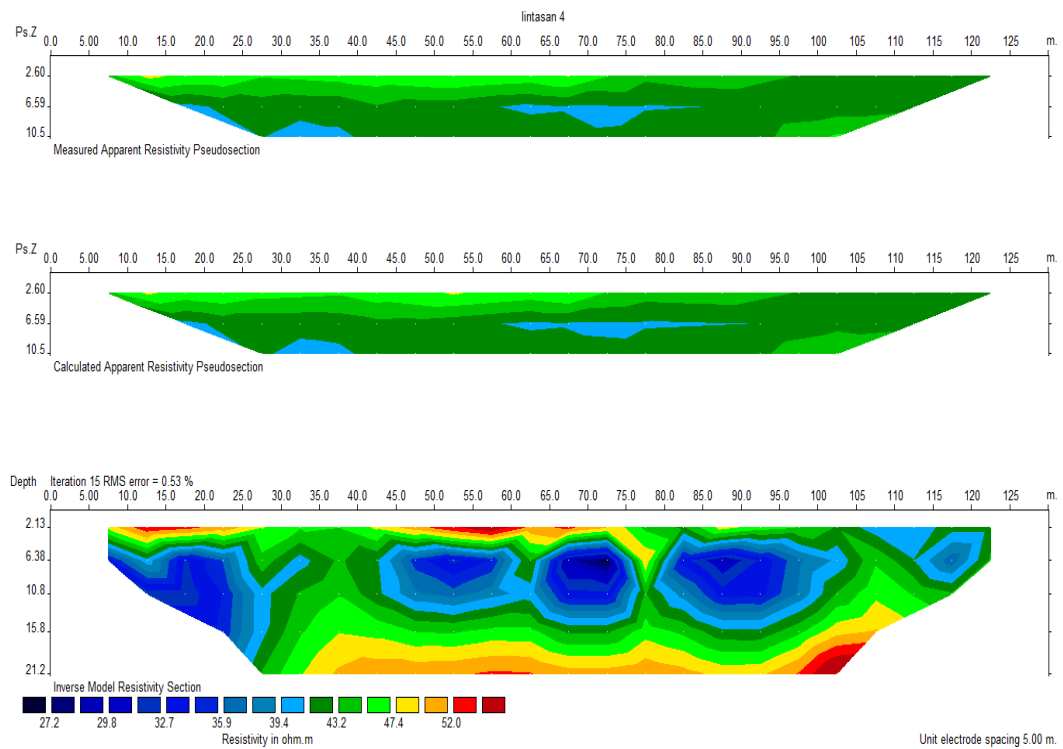
Gambar 4.9 Kondisi tanggul yang longsor

Hasil penelitian menggunakan resistivitas konfigurasi Wenner-Schlumberger dengan hasil penelitian VLF, menunjukkan bahwa untuk lintasan 3 memiliki nilai resistivitas bawah permukaan berkisar antara 0 – 180 ohm meter. Kemudian titik dimana retakan berisi udara terjadi ditunjukkan oleh kisaran nilai resistivitas yang hampir sama, yaitu 180 ohm meter, begitu pula dengan rembesan yang terjadi (berada di sekitar 3 ohm meter).

4.4 Lintasan 4

Lintasan 4 terletak pada koordinat latitude S 7° 26.654' hingga S 7° 26.676' dan longitude E 112° 27.917' hingga E 112° 27.849', dengan elevasi ± 40 di atas permukaan laut. Panjang lintasan 4 adalah 130 meter. Adapun hasil inversi pemodelan 2 dimensi ditunjukkan oleh Gambar 4.10.

Pseudosection pertama dan kedua diperoleh rentang nilai resistivitas 39,4 – 47,4 ohm meter dan *resistivity section* memiliki rentang nilai resistivitas 27,2 - 52 ohm meter. Berdasarkan rentang nilai dari *resistivity section* yang merupakan nilai resistivitas sebenarnya, maka dapat diinterpretasikan struktur bawah permukaan lintasan 4 yang diperlihatkan oleh Tabel 4.4 berdasarkan Tabel 2.2 dan data log daerah penelitian. Hasil penelitian di tanggul pada lintasan 4 diperoleh hasil bahwa tidak terdapat anomali baik berupa retakan berisi udara maupun berisi air.



Gambar 4.10 Penampang lintasan 4

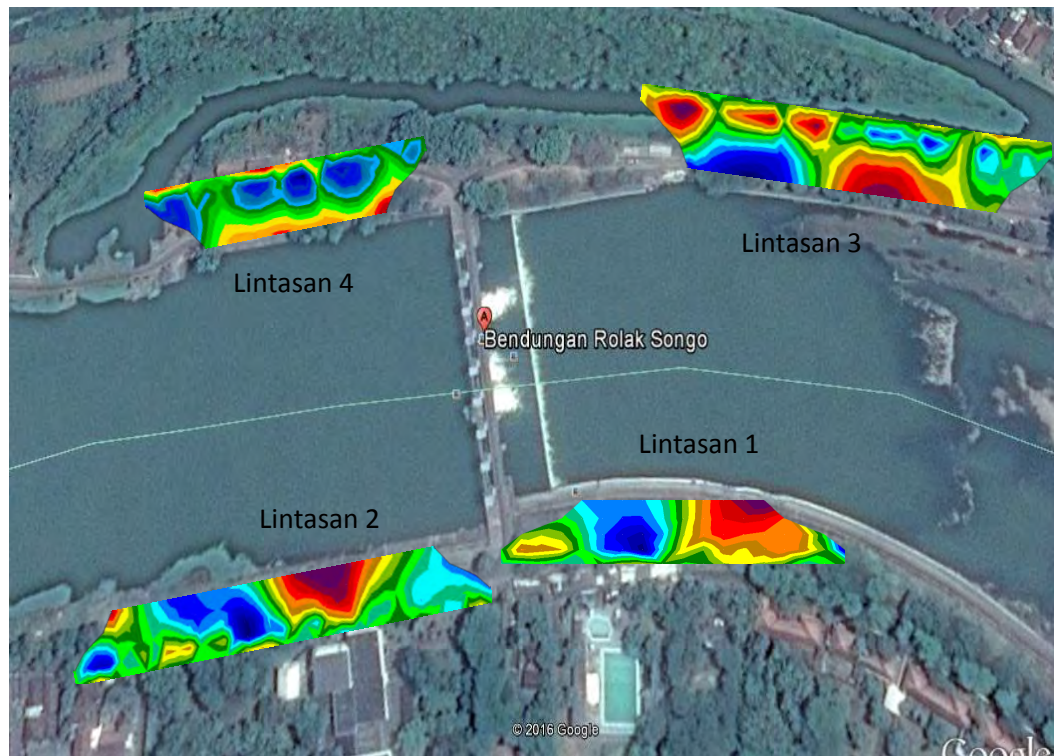
Tabel 4.4 Nilai resistivitas bawah permukaan lintasan 4

No.	Nilai resistivitas (Ωm)	Material
1.	27,2	Pasir
2.	29,8	Pasir
3.	32,7	Pasir
4.	35,9	Pasir, kerikil
5.	39,4	Pasir, kerikil
6.	43,2	Pasir kerikil
7.	47,4	Lempung, pasir
8.	52	Lempung, pasir



Gambar 4.11 Lintasan 4 tampak depan

Gambar 4.12 merupakan kondisi penampang vertikal dari empat lintasan pengukuran di Desa Lengkong dan Mlirip, Mojokerto. Berdasarkan pengukuran di empat lintasan diperoleh hasil evaluasi yaitu tanggul di lintasan 1, lintasan 2, dan lintasan 3 memiliki potensi longsor. Untuk lintasan 2, di titik (titik lebih dari 95 meter) dimana tanggul tidak terbuat dari beton berpotensi akan terjadinya longsor karena telah terjadi rembesan air. Sementara untuk lintasan 1 mengingat arah sungai yang melengkung berpotensi mengikis material penyusun tanggul. Hal tersebut terbukti karena pada kondisi nyata di lintasan 1, di titik lengkungan sungai terjadi keretakan yang telah berisi air (titik 55-65 meter). Untuk lintasan 3 juga memiliki kondisi fisiologi yang sama, dimana titik perlengkungan telah terjadi keretakan di titik 20 – 35 meter. Kemudian untuk lintasan 4, memiliki minimum potensi terhadap longsor karena pada lintasan tersebut tidak ada retakan berisi udara maupun air.



Gambar 4.12 Penampang vertikal dari empat lintasan pengukuran di Desa Lengkong dan Mlirip, Mojokerto.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

A. Tabel Pengukuran

a. Lintasan 1

No.	C1	P1	P2	C2	a	n	k	R	R	rho
1	0	5	10	15	5	1	6.280	352.700	0.3527	11.07478
2	5	10	15	20	5	1	6.280	412.000	0.412	12.9368
3	10	15	20	25	5	1	6.280	373.500	0.3735	11.7279
4	15	20	25	30	5	1	6.280	345.400	0.3454	10.84556
5	20	25	30	35	5	1	6.280	290.300	0.2903	9.11542
6	25	30	35	40	5	1	6.280	294.400	0.2944	9.24416
7	30	35	40	45	5	1	6.280	292.400	0.2924	9.18136
8	35	40	45	50	5	1	6.280	352.700	0.3527	11.07478
9	40	45	50	55	5	1	6.280	291.300	0.2913	9.14682
10	45	50	55	60	5	1	6.280	413.100	0.4131	12.97134
11	50	55	60	65	5	1	6.280	323.600	0.3236	10.16104
12	55	60	65	70	5	1	6.280	394.300	0.3943	12.38102
13	60	65	70	75	5	1	6.280	346.800	0.3468	10.88952
14	65	70	75	80	5	1	6.280	381.900	0.3819	11.99166
15	70	75	80	85	5	1	6.280	387.100	0.3871	12.15494
16	75	80	85	90	5	1	6.280	308.000	0.308	9.6712
17	80	85	90	95	5	1	6.280	312.100	0.3121	9.79994
18	85	90	95	100	5	1	6.280	293.400	0.2934	9.21276
19	0	15	20	35	5	3	37.680	52.340	0.05234	9.860856
20	5	20	25	40	5	3	37.680	53.390	0.05339	10.058676
21	10	25	30	45	5	3	37.680	43.800	0.0438	8.25192
22	15	30	35	50	5	3	37.680	41.620	0.04162	7.841208
23	20	35	40	55	5	3	37.680	41.200	0.0412	7.76208
24	25	40	45	60	5	3	37.680	41.100	0.0411	7.74324
25	30	45	50	65	5	3	37.680	31.420	0.03142	5.919528
26	35	50	55	70	5	3	37.680	42.560	0.04256	8.018304
27	40	55	60	75	5	3	37.680	38.080	0.03808	7.174272
28	45	60	65	80	5	3	37.680	44.950	0.04495	8.46858
29	50	65	70	85	5	3	37.680	45.890	0.04589	8.645676
30	55	70	75	90	5	3	37.680	37.040	0.03704	6.978336
31	60	75	80	95	5	3	37.680	42.560	0.04256	8.018304
32	65	80	85	100	5	3	37.680	44.010	0.04401	8.291484

33	0	25	30	55	5	5	94.200	22.260	0.02226	10.48446
34	5	30	35	60	5	5	94.200	20.810	0.02081	9.80151
35	10	35	40	65	5	5	94.200	21.430	0.02143	10.09353
36	15	40	45	70	5	5	94.200	18.830	0.01883	8.86893
37	20	45	50	75	5	5	94.200	17.890	0.01789	8.42619
38	25	50	55	80	5	5	94.200	16.750	0.01675	7.88925
39	30	55	60	85	5	5	94.200	16.120	0.01612	7.59252
40	35	60	65	90	5	5	94.200	15.210	0.01521	7.16391
41	40	65	70	95	5	5	94.200	14.880	0.01488	7.00848
42	45	70	75	100	5	5	94.200	13.630	0.01363	6.41973

b. Lintasan 2

No	C1	P1	P2	C2	a	n	k	R	R	rho
1	0	5	10	15	5	1	6.280	288.700	0.2887	9.06518
2	5	10	15	20	5	1	6.280	280.900	0.2809	8.82026
3	10	15	20	25	5	1	6.280	316.300	0.3163	9.93182
4	15	20	25	30	5	1	6.280	338.500	0.3385	10.6289
5	20	25	30	35	5	1	6.280	346.800	0.3468	10.88952
6	25	30	35	40	5	1	6.280	342.300	0.3423	10.74822
7	30	35	40	45	5	1	6.280	294.400	0.2944	9.24416
8	35	40	45	50	5	1	6.280	306.900	0.3069	9.63666
9	40	45	50	55	5	1	6.280	343.300	0.3433	10.77962
10	45	50	55	60	5	1	6.280	260.100	0.2601	8.16714
11	50	55	60	65	5	1	6.280	265.300	0.2653	8.33042
12	55	60	65	70	5	1	6.280	305.900	0.3059	9.60526
13	60	65	70	75	5	1	6.280	282.000	0.282	8.8548
14	65	70	75	80	5	1	6.280	315.300	0.3153	9.90042
15	70	75	80	85	5	1	6.280	322.500	0.3225	10.1265
16	75	80	85	90	5	1	6.280	374.600	0.3746	11.76244
17	80	85	90	95	5	1	6.280	426.600	0.4266	13.39524
18	85	90	95	100	5	1	6.280	411.000	0.411	12.9054
19	90	95	100	105	5	1	6.280	466.100	0.4661	14.63554
20	95	100	105	110	5	1	6.280	484.900	0.4849	15.22586
21	100	105	110	115	5	1	6.280	412.000	0.412	12.9368
22	105	110	115	120	5	1	6.280	457.800	0.4578	14.37492
23	110	115	120	125	5	1	6.280	396.400	0.3964	12.44696
24	115	120	125	130	5	1	6.280	515.600	0.5156	16.18984
25	120	125	130	135	5	1	6.280	500.800	0.5008	15.72512

26	125	130	135	140	5	1	6.280	520.800	0.5208	16.35312
27	130	135	140	145	5	1	6.280	514.300	0.5143	16.14902
28	135	140	145	150	5	1	6.280	517.100	0.5171	16.23694
29	140	145	150	155	5	1	6.280	407.900	0.4079	12.80806
30	145	150	155	160	5	1	6.280	469.300	0.4693	14.73602
31	150	155	160	165	5	1	6.280	437.000	0.437	13.7218
32	155	160	165	170	5	1	6.280	500.500	0.5005	15.7157
33	160	165	170	175	5	1	6.280	515.000	0.515	16.171
34	165	170	175	180	5	1	6.280	441.200	0.4412	13.85368
35	170	175	180	185	5	1	6.280	395.400	0.3954	12.41556
36	175	180	185	190	5	1	6.280	351.700	0.3517	11.04338
37	180	185	190	195	5	1	6.280	466.100	0.4661	14.63554
38	185	190	195	200	5	1	6.280	378.700	0.3787	11.89118
39	0	15	20	35	5	3	37.680	55.150	0.05515	10.39026
40	5	20	25	40	5	3	37.680	44.530	0.04453	8.389452
41	10	25	30	45	5	3	37.680	50.150	0.05015	9.44826
42	15	30	35	50	5	3	37.680	50.500	0.0505	9.5142
43	20	35	40	55	5	3	37.680	46.750	0.04675	8.8077
44	25	40	45	60	5	3	37.680	39.330	0.03933	7.409772
45	30	45	50	65	5	3	37.680	29.960	0.02996	5.644464
46	35	50	55	70	5	3	37.680	28.820	0.02882	5.429688
47	40	55	60	75	5	3	37.680	38.800	0.0388	7.30992
48	45	60	65	80	5	3	37.680	45.160	0.04516	8.508144
49	50	65	70	85	5	3	37.680	42.450	0.04245	7.99758
50	55	70	75	90	5	3	37.680	44.000	0.044	8.2896
51	60	75	80	95	5	3	37.680	42.500	0.0425	8.007
52	65	80	85	100	5	3	37.680	34.020	0.03402	6.409368
53	70	85	90	105	5	3	37.680	38.750	0.03875	7.3005
54	75	90	95	110	5	3	37.680	48.890	0.04889	9.210876
55	80	95	100	115	5	3	37.680	50.200	0.0502	9.45768
56	85	100	105	120	5	3	37.680	52.030	0.05203	9.802452
57	90	105	110	125	5	3	37.680	44.740	0.04474	8.429016
58	95	110	115	130	5	3	37.680	50.150	0.05015	9.44826
59	100	115	120	135	5	3	37.680	50.980	0.05098	9.604632
60	105	120	125	140	5	3	37.680	52.350	0.05235	9.86274
61	110	125	130	145	5	3	37.680	40.250	0.04025	7.5831
62	115	130	135	150	5	3	37.680	42.560	0.04256	8.018304
63	120	135	140	155	5	3	37.680	45.260	0.04526	8.526984
64	125	140	145	160	5	3	37.680	51.190	0.05119	9.644196

65	130	145	150	165	5	3	37.680	49.800	0.0498	9.38232
66	135	150	155	170	5	3	37.680	46.610	0.04661	8.781324
67	140	155	160	175	5	3	37.680	44.750	0.04475	8.4309
68	145	160	165	180	5	3	37.680	43.080	0.04308	8.116272
69	150	165	170	185	5	3	37.680	40.060	0.04006	7.547304
70	155	170	175	190	5	3	37.680	48.700	0.0487	9.17508
71	160	175	180	195	5	3	37.680	54.760	0.05476	10.31678
72	165	180	185	200	5	3	37.680	52.030	0.05203	9.802452
73	0	25	30	55	5	5	94.200	19.250	0.01925	9.06675
74	5	30	35	60	5	5	94.200	19.890	0.01989	9.36819
75	10	35	40	65	5	5	94.200	18.730	0.01873	8.82183
76	15	40	45	70	5	5	94.200	16.850	0.01685	7.93635
77	20	45	50	75	5	5	94.200	17.060	0.01706	8.03526
78	25	50	55	80	5	5	94.200	18.830	0.01883	8.86893
79	30	55	60	85	5	5	94.200	16.440	0.01644	7.74324
80	35	60	65	90	5	5	94.200	18.730	0.01873	8.82183
81	40	65	70	95	5	5	94.200	17.480	0.01748	8.23308
82	45	70	75	100	5	5	94.200	17.370	0.01737	8.18127
83	50	75	80	105	5	5	94.200	15.400	0.0154	7.2534
84	55	80	85	110	5	5	94.200	17.580	0.01758	8.28018
85	60	85	90	115	5	5	94.200	21.200	0.0212	9.9852
86	65	90	95	120	5	5	94.200	20.810	0.02081	9.80151
87	70	95	100	125	5	5	94.200	17.250	0.01725	8.12475
88	75	100	105	130	5	5	94.200	18.200	0.0182	8.5722
89	80	105	110	135	5	5	94.200	16.080	0.01608	7.57368
90	85	110	115	140	5	5	94.200	19.450	0.01945	9.16095
91	90	115	120	145	5	5	94.200	18.750	0.01875	8.83125
92	95	120	125	150	5	5	94.200	17.890	0.01789	8.42619
93	100	125	130	155	5	5	94.200	15.920	0.01592	7.49832
94	105	130	135	160	5	5	94.200	16.810	0.01681	7.91751
95	110	135	140	165	5	5	94.200	18.890	0.01889	8.89719
96	115	140	145	170	5	5	94.200	19.970	0.01997	9.40587
97	120	145	150	175	5	5	94.200	16.750	0.01675	7.88925
98	125	150	155	180	5	5	94.200	14.880	0.01488	7.00848
99	130	155	160	185	5	5	94.200	13.630	0.01363	6.41973
100	135	160	165	190	5	5	94.200	16.020	0.01602	7.54542
101	140	165	170	195	5	5	94.200	17.350	0.01735	8.17185
102	145	170	175	200	5	5	94.200	14.970	0.01497	7.05087

c. Lintasan 3

No	C1	P1	P2	C2	a	n	k	R	R	rho
1	0	5	10	15	5	1	6.280	457.800	0.4578	14.37492
2	5	10	15	20	5	1	6.280	569.200	0.5692	17.87288
3	10	15	20	25	5	1	6.280	536.900	0.5369	16.85866
4	15	20	25	30	5	1	6.280	544.200	0.5442	17.08788
5	20	25	30	35	5	1	6.280	490.100	0.4901	15.38914
6	25	30	35	40	5	1	6.280	445.300	0.4453	13.98242
7	30	35	40	45	5	1	6.280	507.800	0.5078	15.94492
8	35	40	45	50	5	1	6.280	525.500	0.5255	16.5007
9	40	45	50	55	5	1	6.280	460.900	0.4609	14.47226
10	45	50	55	60	5	1	6.280	547.300	0.5473	17.18522
11	50	55	60	65	5	1	6.280	495.400	0.4954	15.55556
12	55	60	65	70	5	1	6.280	520.300	0.5203	16.33742
13	60	65	70	75	5	1	6.280	555.650	0.55565	17.44741
14	65	70	75	80	5	1	6.280	485.900	0.4859	15.25726
15	70	75	80	85	5	1	6.280	434.900	0.4349	13.65586
16	75	80	85	90	5	1	6.280	416.200	0.4162	13.06868
17	80	85	90	95	5	1	6.280	395.400	0.3954	12.41556
18	85	90	95	100	5	1	6.280	376.780	0.37678	11.83089
19	90	95	100	105	5	1	6.280	352.400	0.3524	11.06536
20	95	100	105	110	5	1	6.280	317.300	0.3173	9.96322
21	100	105	110	115	5	1	6.280	329.800	0.3298	10.35572
22	105	110	115	120	5	1	6.280	365.400	0.3654	11.47356
23	110	115	120	125	5	1	6.280	382.500	0.3825	12.0105
24	115	120	125	130	5	1	6.280	390.540	0.39054	12.26296
25	0	15	20	35	5	3	37.680	40.160	0.04016	7.566144
26	5	20	25	40	5	3	37.680	45.990	0.04599	8.664516
27	10	25	30	45	5	3	37.680	48.380	0.04838	9.114792
28	15	30	35	50	5	3	37.680	45.780	0.04578	8.624952
29	20	35	40	55	5	3	37.680	45.780	0.04578	8.624952
30	25	40	45	60	5	3	37.680	47.450	0.04745	8.93958
31	30	45	50	65	5	3	37.680	47.760	0.04776	8.997984
32	35	50	55	70	5	3	37.680	47.970	0.04797	9.037548
33	40	55	60	75	5	3	37.680	42.240	0.04224	7.958016
34	45	60	65	80	5	3	37.680	46.300	0.0463	8.72292
35	50	65	70	85	5	3	37.680	45.570	0.04557	8.585388
36	55	70	75	90	5	3	37.680	41.720	0.04172	7.860048

37	60	75	80	95	5	3	37.680	46.510	0.04651	8.762484
38	65	80	85	100	5	3	37.680	49.920	0.04992	9.404928
75	70	85	90	105	5	3	37.680	42.100	0.0421	7.93164
76	75	90	95	110	5	3	37.680	44.740	0.04474	8.429016
77	80	95	100	115	5	3	37.680	49.320	0.04932	9.291888
78	85	100	105	120	5	3	37.680	42.760	0.04276	8.055984
79	90	105	110	125	5	3	37.680	42.240	0.04224	7.958016
80	95	110	115	130	5	3	37.680	50.570	0.05057	9.527388
81	0	25	30	55	5	5	94.200	21.850	0.02185	10.29135
82	5	30	35	60	5	5	94.200	22.060	0.02206	10.39026
83	10	35	40	65	5	5	94.200	24.140	0.02414	11.36994
84	15	40	45	70	5	5	94.200	24.550	0.02455	11.56305
85	20	45	50	75	5	5	94.200	23.100	0.0231	10.8801
86	25	50	55	80	5	5	94.200	23.820	0.02382	11.21922
87	30	55	60	85	5	5	94.200	21.330	0.02133	10.04643
88	35	60	65	90	5	5	94.200	24.870	0.02487	11.71377
89	40	65	70	95	5	5	94.200	25.490	0.02549	12.00579
90	45	70	75	100	5	5	94.200	24.140	0.02414	11.36994
91	50	75	80	105	5	5	94.200	22.680	0.02268	10.68228
92	55	80	85	110	5	5	94.200	24.970	0.02497	11.76087
93	60	85	90	115	5	5	94.200	19.000	0.019	8.949
94	65	90	95	120	5	5	94.200	20.080	0.02008	9.45768
95	70	95	100	125	5	5	94.200	22.160	0.02216	10.43736
96	75	100	105	130	5	5	94.200	20.080	0.02008	9.45768

d. Lintasan 4

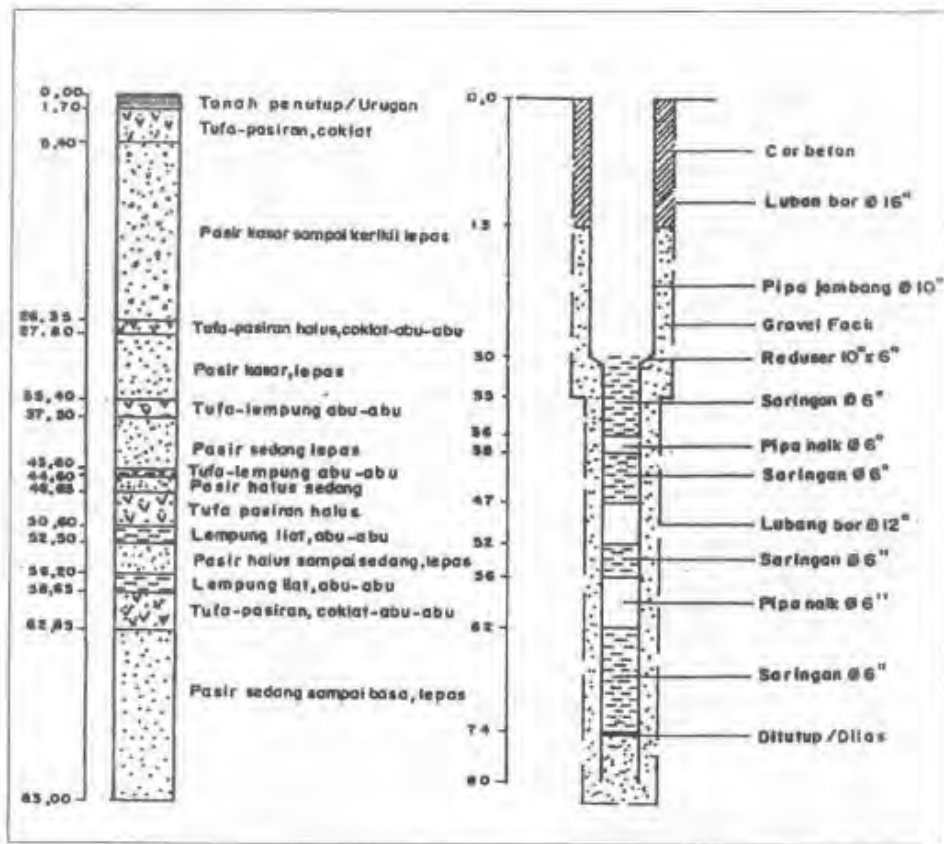
No	C1	P1	P2	C2	a	n	k	R	R	rho
1	0	5	10	15	5.00	1	6.280	781.300	0.7813	24.53282
2	5	10	15	20	5.00	1	6.280	763.300	0.7633	23.96762
3	10	15	20	25	5.00	1	6.280	778.300	0.7783	24.43862
4	15	20	25	30	5.00	1	6.280	806.400	0.8064	25.32096
5	20	25	30	35	5.00	1	6.280	824.700	0.8247	25.89558
6	25	30	35	40	5.00	1	6.280	874.200	0.8742	27.44988
7	30	35	40	45	5.00	1	6.280	916.000	0.916	28.7624
8	35	40	45	50	5.00	1	6.280	641.100	0.6411	20.13054
9	40	45	50	55	5.00	1	6.280	638.800	0.6388	20.05832
10	45	50	55	60	5.00	1	6.280	630.600	0.6306	19.80084
11	50	55	60	65	5.00	1	6.280	659.800	0.6598	20.71772

12	55	60	65	70	5.00	1	6.280	698.200	0.6982	21.92348
13	60	65	70	75	5.00	1	6.280	627.400	0.6274	19.70036
14	65	70	75	80	5.00	1	6.280	635.600	0.6356	19.95784
15	70	75	80	85	5.00	1	6.280	661.200	0.6612	20.76168
16	75	80	85	90	5.00	1	6.280	649.650	0.64965	20.39901
17	80	85	90	95	5.00	1	6.280	666.900	0.6669	20.94066
18	85	90	95	100	5.00	1	6.280	657.600	0.6576	20.64864
19	90	95	100	105	5.00	1	6.280	698.200	0.6982	21.92348
20	95	100	105	110	5.00	1	6.280	623.300	0.6233	19.57162
21	100	105	110	115	5.00	1	6.280	596.200	0.5962	18.72068
22	105	110	115	120	5.00	1	6.280	564.000	0.564	17.7096
23	110	115	120	125	5.00	1	6.280	517.100	0.5171	16.23694
24	115	120	125	130	5.00	1	6.280	542.100	0.5421	17.02194
25	120	125	130	135	5.00	1	6.280	568.100	0.5681	17.83834
26	125	130	135	140	5.00	1	6.280	542.700	0.5427	17.04078
27	130	135	140	145	5.00	1	6.280	528.600	0.5286	16.59804
28	135	140	145	150	5.00	1	6.280	511.900	0.5119	16.07366
29	140	145	150	155	5.00	1	6.280	520.110	0.52011	16.33145
30	145	150	155	160	5.00	1	6.280	520.250	0.52025	16.33585
31	150	155	160	165	5.00	1	6.280	510.900	0.5109	16.04226
32	155	160	165	170	5.00	1	6.280	549.800	0.5498	17.26372
33	160	165	170	175	5.00	1	6.280	520.600	0.5206	16.34684
34	165	170	175	180	5.00	1	6.280	539.450	0.53945	16.93873
35	170	175	180	185	5.00	1	6.280	504.800	0.5048	15.85072
36	175	180	185	190	5.00	1	6.280	526.200	0.5262	16.52268
37	180	185	190	195	5.00	1	6.280	559.740	0.55974	17.57584
38	185	190	195	200	5.00	1	6.280	545.800	0.5458	17.13812
75	0	15	20	35	5.00	3	37.680	245.600	0.2456	46.27104
76	5	20	25	40	5.00	3	37.680	249.700	0.2497	47.04348
77	10	25	30	45	5.00	3	37.680	229.000	0.229	43.1436
78	15	30	35	50	5.00	3	37.680	218.000	0.218	41.0712
79	20	35	40	55	5.00	3	37.680	180.000	0.18	33.912
80	25	40	45	60	5.00	3	37.680	166.400	0.1664	31.34976
81	30	45	50	65	5.00	3	37.680	140.400	0.1404	26.45136
82	35	50	55	70	5.00	3	37.680	127.900	0.1279	24.09636
83	40	55	60	75	5.00	3	37.680	102.100	0.1021	19.23564
84	45	60	65	80	5.00	3	37.680	106.400	0.1064	20.04576
85	50	65	70	85	5.00	3	37.680	117.000	0.117	22.0428
86	55	70	75	90	5.00	3	37.680	104.400	0.1044	19.66896

87	60	75	80	95	5.00	3	37.680	102.400	0.1024	19.29216
88	65	80	85	100	5.00	3	37.680	102.500	0.1025	19.311
89	70	85	90	105	5.00	3	37.680	99.710	0.09971	18.78536
90	75	90	95	110	5.00	3	37.680	94.200	0.0942	17.74728
91	80	95	100	115	5.00	3	37.680	96.300	0.0963	18.14292
92	85	100	105	120	5.00	3	37.680	97.000	0.097	18.2748
93	90	105	110	125	5.00	3	37.680	98.850	0.09885	18.62334
94	95	110	115	130	5.00	3	37.680	82.310	0.08231	15.5072
95	100	115	120	135	5.00	3	37.680	78.200	0.0782	14.73288
96	105	120	125	140	5.00	3	37.680	76.200	0.0762	14.35608
97	110	125	130	145	5.00	3	37.680	70.900	0.0709	13.35756
98	115	130	135	150	5.00	3	37.680	72.400	0.0724	13.64016
99	120	135	140	155	5.00	3	37.680	77.900	0.0779	14.67636
100	125	140	145	160	5.00	3	37.680	71.370	0.07137	13.44611
101	130	145	150	165	5.00	3	37.680	73.800	0.0738	13.90392
102	135	150	155	170	5.00	3	37.680	70.500	0.0705	13.2822
103	140	155	160	175	5.00	3	37.680	78.850	0.07885	14.85534
104	145	160	165	180	5.00	3	37.680	77.210	0.07721	14.54636
105	150	165	170	185	5.00	3	37.680	77.200	0.0772	14.54448
106	155	170	175	190	5.00	3	37.680	79.810	0.07981	15.0362
107	160	175	180	195	5.00	3	37.680	72.210	0.07221	13.60436
108	165	180	185	200	5.00	3	37.680	69.610	0.06961	13.11452
109	0	25	30	55	5.00	5	94.200	62.100	0.0621	29.2491
110	5	30	35	60	5.00	5	94.200	59.200	0.0592	27.8832
111	10	35	40	65	5.00	5	94.200	49.010	0.04901	23.08371
112	15	40	45	70	5.00	5	94.200	46.100	0.0461	21.7131
113	20	45	50	75	5.00	5	94.200	47.550	0.04755	22.39605
114	25	50	55	80	5.00	5	94.200	49.210	0.04921	23.17791
115	30	55	60	85	5.00	5	94.200	47.260	0.04726	22.25946
116	35	60	65	90	5.00	5	94.200	37.700	0.0377	17.7567
117	40	65	70	95	5.00	5	94.200	34.720	0.03472	16.35312
118	45	70	75	100	5.00	5	94.200	34.750	0.03475	16.36725
119	50	75	80	105	5.00	5	94.200	38.900	0.0389	18.3219
120	55	80	85	110	5.00	5	94.200	36.250	0.03625	17.07375
121	60	85	90	115	5.00	5	94.200	34.300	0.0343	16.1553
122	65	90	95	120	5.00	5	94.200	35.200	0.0352	16.5792
123	70	95	100	125	5.00	5	94.200	36.420	0.03642	17.15382
124	75	100	105	130	5.00	5	94.200	35.980	0.03598	16.94658
125	80	105	110	135	5.00	5	94.200	36.090	0.03609	16.99839

126	85	110	115	140	5.00	5	94.200	39.750	0.03975	18.72225
127	90	115	120	145	5.00	5	94.200	37.460	0.03746	17.64366
128	95	120	125	150	5.00	5	94.200	33.500	0.0335	15.7785
129	100	125	130	155	5.00	5	94.200	36.700	0.0367	17.2857
130	105	130	135	160	5.00	5	94.200	37.600	0.0376	17.7096
131	110	135	140	165	5.00	5	94.200	34.300	0.0343	16.1553
132	115	140	145	170	5.00	5	94.200	35.720	0.03572	16.82412
133	120	145	150	175	5.00	5	94.200	36.300	0.0363	17.0973
134	125	150	155	180	5.00	5	94.200	35.400	0.0354	16.6734
135	130	155	160	185	5.00	5	94.200	33.100	0.0331	15.5901
136	135	160	165	190	5.00	5	94.200	31.880	0.03188	15.01548
137	140	165	170	195	5.00	5	94.200	31.460	0.03146	14.81766
138	145	170	175	200	5.00	5	94.200	30.060	0.03006	14.15826

B. Data Sounding Tanggul



Sumber : PT. Ajinomoto Indonesia (1999)

Data *sounding* tersebut diperoleh dari PT. Ajinomoto Indonesia, pabrik tersebut berada pada jarak 150 meter dari lokasi penelitian.



BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Penelitian untuk mengevaluasi tanggul Sungai Brantas dengan metode resistivitas konfigurasi Wenner Schlumberger di Desa Lengkong dan Desa Mlirip Mojokerto telah dilakukan. Berdasarkan hasil penelitian untuk mengevaluasi tanggul Sungai Brantas di Desa Lengkong dan Mlirip, Mojokerto diduga ada retakan yang berisi udara dan air pada tanggul di lintasan 1, 2, dan 3. Tanggul pada ketiga lintasan tersebut dapat dikategorikan kurang layak atau kurang aman sehingga berpotensi mengakibatkan erosi internal yang kemudian akan menyebabkan keruntuhan tubuh tanggul yang lebih parah. Sementara lintasan 4, diduga tidak terdapat keretakan baik berisi udara maupun air. Oleh karenanya lintasan 4 memiliki potensi minimum terhadap longsor sehingga dapat dikatakan bahwa tanggul pada lintasan tersebut masih layak atau berfungsi dengan baik.

5.2 Saran

Pada lintasan tersebut tanggul yang sudah runtuh, yaitu di lintasan 1 dan 3 sangat dekat dengan jalan raya, apabila terjadi keruntuhan lagi akan menyebabkan jalan ambrol sehingga membahayakan bagi pengendara kendaraan yang melintasi jalur tersebut. Oleh karenanya perlu dilakukan evaluasi kembali oleh pihak terkait guna mencegah terjadi keruntuhan tanggul untuk kemudian dilakukan perbaikan.

Secara teknis apabila ada pihak yang ingin melakukan penelitian di lokasi yang sama, peneliti menyarankan menggunakan metode geofisika yang mampu mendeteksi tanggul dengan penetrasi kedalaman yang lebih dalam. Hal tersebut diperlukan guna meneliti apakah terdapat retakan atau patahan dan rembesan lain.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Aal, G. Z. A., *et al.* 2004. *Geophysical Investigation of Seepage From an Earh Fill Dam, Washington Country*. Dept. of Geology and Geophysics, University of Missouri-Rolla.
- Aitsebaomo, F.O, O.A Adeyemi, dan H.A Quadri. 2013. “Electromagnetic Survey of Erosion in Awba, Ibadan, Nigeria Embankment Dam”. *International Journal of Engineering and Science*, Vol. 3, Issue 3, pp 01-05.
- Arif, M., 2008. *Analisa Balik Kelongsoran (Studi Kasus di Jember)*. Surabaya : ITS.
- Balai Besar Wilayah Sungai Brantas .2011. www.pu.go.id/uploads/services/2011-11-30-11-37-29.pdf.
- Balai Pengelolaan DAS Brantas, 2003. www.ppejawa.com/ekoregion/das-brantas.
- Borragan, V., Alejandro. 2014. *Modelling Internal Erosion Within An Embankment Dam Prior to Breaching*. Master Thesis. KTH Royal Institute of Technology : Sweden.
- Crookes, N. 2005. *Investigation of Extreme Flood Processes and Uncertainty*. http://www.impact-project.net/AnnexII_DetailedTechnicalReports/AnnexII_PartD_WP5/WP5_technical_Report_V1_2.pdf
- Department of Environmental Services. Tanpa Tahun. *Typical Failure Modes of Embankment Dams*. www.des.nh.gov.
- Engemoen, William O. 2011. *Bureau of Reclamation Experiences With Internal Erosion Incidents*. Proceeding of Institute of Water Structures, Vol. 13.
- Grandis, Hendra. 2009. *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Bhumi Printing : Bandung
- Gunn, D. A., *et.al.* 2015. “Moisture Monitoring in Clay Embankments Using Electrical Resistivity Tomography”. *Construction and Building Materials*, Vol. 92, hal. 82-94.
- Hardiyatmo, Hary Christadi, 2006. *Penanganan Tanah Longsor dan Erosi*. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Karaoulis, M., A. Revil, P. Tsourlos, D.D. Werkema, B. J. Minsley. 2013. “IP4DI: A software for time-lapse 2D/3D DC-resistivity and induced polarization tomography”. *Journal Computer and Geosciences*, Vol. 54, hal. 164-170.

- Loke, M. H. 1999. *Electrical Imaging Surveys for Enviromental and Engineering Studies*. Malaysia.
- Loke, M. H., dan T. Dahlin. 2002. "A Comparison of The Gauss Newton and Quasi Newton Methods in Resistivity Imaging Inversion". *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 49, hal. 149-162.
- Mainali, Ganesh. 2006. *Monitoring of Tailing Dams with Geophysical Methods*. Thesis. Lulea University of Technology.
- Milsom, J., 2003. *Field Geophysics Third Edition*. Inggris : John Wiley & Sons Ltd. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ
- Mori, Guido. 2009. *The Use of Ground Penetrating Radar and Alternative Geophysical Technique for Assessing Embankments and Dykes Safety*. Doctoral Thesis. Department of Earth and Geoenvironmental Science, University of Bologna.
- Narita, Kunitomo. 2000. *Design and Construction of Embankment Dams*. Department of Civil Engineering, Aichi Institute of Technology.
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia. 2015. *Penetapan Garis Sempadan Sungai dan Garis Sempadan Danau*.
- Qiang, Jian-ke, Xue Han, dan Shi-kun Dai. 2013. "3D DC Resistivity Inversion with Topography Based on Regularized Conjugate Gradient Method". *International Journal of Geophysics*, Vol. 2013.
- Realita, Arie. 2016. *Aplikasi Metode Very Low Frequency Electromagnetic Untuk Mitigasi Bencana Longsor Di Area Tanggul Sungai Brantas Mojokerto*. Tesis Magister, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Reynolds, J. M., 1997. *An introduction to apllied and Geophysics*. Inggris : John Wiley & Sons Ltd. Baffins, Chichester, West Sussex PO19 IUD.
- Sjodahl, Pontus. 2006. *Resistivity Investigation and Monitoring for Detection of Internal Erosion and Anomalous Seepage in Embankment Dams*. Doctoral Thesis. Engineering Geology, Lund University : Sweden.
- Sjodahl, P., T. Dahlin, S. Johansson. 2009. "Embankment Dam Seepage Evaluation From ResistivityMonitoring Data". *Near Surface Geophysics*, hal. 463-474.

- Sosrodarsono, S., 1985. Perbaikan dan Pengaturan Sungai, Pt. Pradnya Paramita, Jakarta
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., 1990. *Applied Geophysics Second Edition*. UK : Cambridge University Press.
- Tim Penyusun Rancangan Pedoman Teknis Bahan Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil. 2007. *Pedoman Penyusunan Spesifikasi Teknis Volume IV : Pengaman Sungai Bagian-4 : Tanggul*.
- Warnana, Dwa Desa. 2008. "Identifikasi Scouring sebagai Potensi Kelongsoran Tanggul Sungai Bengawan Solo Berdasarkan Survei GPR (Studi Kasus Desa Widang, Kabupaten Tuban)". *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, Vol.4, No,2.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIOGRAFI PENULIS



Penulis tesis ini bernama Firdha Kusuma Ayu Anggraeni merupakan anak tunggal dari Bapak Edy Sutanto dan Ibu Antarini yang lahir di Jember, Jawa Timur pada tanggal 11 Februari 1991. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN Karang Rejo II Jember (1997-2003), SMPN 2 Jember (2003-2006), SMAN 1 Jember (2006-2009), Sarjana Strata 1 (S1) Fisika di Universitas Jember (2009-2013), dan Magister (S2) Fisika di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (2014-2016). Baik S1 maupun S2 penulis mengambil bidang minat Geofisika. Penulis pernah mengikuti *The Annual Basic Science International Conference* ke-6 yang diselenggarakan oleh Universitas Brawijaya, Malang (2016) sebagai pemateri. Penulis juga mengikuti *International Seminar On Science and Technology* (ISST) pada tahun 2016 sebagai pemateri yang diselenggarakan oleh Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Akhir kata apabila ada kritik dan saran dapat mengirimkan email ke alamat: firdhakusuma.ayu@gmail.com